

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ILICH HUGO CONTRERAS VERÁSTEGUI

**ESTUDO DE MÉTODO DE EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADOS DE  
EDIFICAÇÕES USANDO DADOS PONTUAIS LASER SCANNER**

CURITIBA

2014

ILICH HUGO CONTRERAS VERÁSTEGUI

**ESTUDO DE MÉTODO DE EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADOS DE  
EDIFICAÇÕES USANDO DADOS PONTUAIS LASER SCANNER.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal de Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

**CURITIBA**

**2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

V476e

Verástegui, Ilich Hugo Contreras

Estudo de método de extração de contornos de telhados de edificações usando dados pontuais laser scanner / Ilich Hugo Contreras Verástegui. – Curitiba, 2014.  
111 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2014.

Orientador: Edson Aparecido Mitishita.

1. Extração de feições. 2. LIDAR. 3. Imagem hipsométrica. I. Universidade Federal do Paraná.  
II. Mitishita, Edson Aparecido. III. IV. Título.

CDD: 526.1

---

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214

## TERMO DE APROVAÇÃO

ILICH HUGO CONTRERAS VERÁSTEGUI

*“ESTUDO DE EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADOS DE EDIFICAÇÕES  
USANDO DADOS PONTUAIS LASER SCANNER”*

Dissertação nº 268 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

  
Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz  
Universidade Estadual Paulista, UNESP

  
Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 18 de fevereiro de 2014.

*Aos meus pais, Hugo e Anita.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela vida e as oportunidades concedidas.

Aos meus pais, Hugo e Anita pela educação, apoio, amor incondicional sempre.

À Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita pela orientação, ensinamentos, paciência na realização desta dissertação.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

Ao laboratório de Fotogrametria do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

À CAPES por proporcionar a bolsa de estudos durante os dois anos de pesquisa.

À ENGEFOTO, que através do doutorando Leonardo Ercolin Filho ajudou disponibilizando informações pertinentes.

Aos professores do PPGCG por terem me ajudado a acrescentar uma bagagem valiosa de conhecimentos.

Aos colegas dos diferentes laboratórios e grupos de pesquisa do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésica, em especial ao grupo de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

Aos amigos da iniciação científica do Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Ao Professor Dr. Jorge Antonio Silva Centeno por estar sempre disposto a me ajudar.

E aos Professores participantes da banca examinadora, pelas críticas, sugestões e contribuições ao trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para a extração semiautomática de bordas de telhados de edificações a partir de um conjunto de pontos oriundo de um levantamento realizado com o sistema LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Inicialmente, extraem-se manualmente áreas de estudo com diferentes edificações. Os pontos LIDAR que definem a borda do telhado foram determinados a partir da classificação de pontos pertencentes ao telhado das edificações gerando regiões representativas das águas. Os pontos LIDAR foram processados automaticamente de forma a possibilitar a reconstrução de feições lineares que formam os contornos das edificações. Por meio da interseção destas linhas calculam-se os vértices que definem o contorno das diferentes edificações. Com o propósito da verificação de qualidade realizou-se a digitalização manual, numa imagem hipsométrica, de vértices que definem a borda dos telhados. As discrepâncias, resultado da comparação entre os dois tipos de vértices, são deslocamentos nas coordenadas E, N. Os melhores resultados mostram indicadores de completeza próximos a oitenta por cento com valores de deslocamentos na ordem de centímetros. Entretanto em outros casos, os indicadores de completeza foram próximos a sessenta por cento e deslocamentos na ordem de metros.

Palavras-chave: Extração de feições. LIDAR. Imagem hipsométrica.

## ABSTRACT

This work presents a proposal methodology for the semi-automatic extraction of building roof contour from LIDAR (*Light Detection And Ranging*) point cloud data. Initially, manual buildings extractions are performed in different areas of study with different buildings. The LIDAR points were processing automatically to reconstruct linear details and contours building. The intersections lines were performed to identify the points that define the building roof contour of different buildings. To verify the quality of the automatic methodology, check points were extracted by a digitalization of building roofs using a LIDAR hypsometric image. Planimetric discrepancies of the check points (build roof vertex) are computed to verify quality of the semi automatic extraction of the proposed methodology. Best results resulted completeness factor near to eighty percent and planimetric displacement near to centimeters order. Worse results resulted completeness factor near to sixty percent and planimetric displacement near to meters order.

Keywords: Feature extraction. LIDAR. Hypsometric image.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - NIVEIS DE DETALHES DE MODELOS DE EDIFICAÇÕES. ....	28
FIGURA 2 - UNIÃO PELA CONDIÇÃO DE FECHAMENTO. ....	30
FIGURA 3 - DETECÇÃO DE ESQUINAS .....	31
FIGURA 4 - SIMETRIA NA CONSTRUÇÃO DE CONTORNOS RECTANGULARES .....	31
FIGURA 5 - PARALELISMO NA CONSTRUÇÃO DE CONTORNOS RECTANGULARES .....	32
FIGURA 6 - DETECÇÃO DE PLANOS POR MEIO DE CRESCIMENTO DE REGIÕES. ....	39
FIGURA 7 - ALGORITMO BÁSICO DOUGLAS-PEUCKER USADO NA SEGMENTAÇÃO SCAN LINE. ....	41
FIGURA 8 - PONTOS AJUSTADOS COMO RETA. ....	43
FIGURA 9 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY. ....	45
FIGURA 10 - ETAPAS GERAIS DA METODOLOGIA. ....	46
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DA DEFINIÇÃO DA AREA DE INTERESSE. ....	47
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DE SEGMENTAÇÃO DE PONTOS LIDAR. ....	48
FIGURA 13 - DEFINIÇÃO DA BORDA DA ÁGUA. ....	51
FIGURA 14 - CONECTIVIDADE DOS SEGMENTOS. ....	53
FIGURA 15 - TIPOS DE CONTORNOS. ....	56
FIGURA 16 - IMAGEM HIPSOMETRICA. ....	60
FIGURA 17 - ÁREA A1. ....	61
FIGURA 18 - ÁREA A2. ....	62
FIGURA 19 - ÁREA A3. ....	63
FIGURA 20 - ÁREA A4. ....	64
FIGURA 21 - SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM Gemini. ....	65
FIGURA 22 - PAQ A1 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	67
FIGURA 23 - PAQ A2 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	68
FIGURA 24 - PAQ A3 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	69
FIGURA 25 - PAQ A4 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	70
FIGURA 26 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 1. ....	72
FIGURA 27 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE: EDIFICAÇÃO 1. ....	73
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 1. ....	76

FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 1.....	77
FIGURA 30 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 1.....	78
FIGURA 31 - TELHADO COM VEGETAÇÃO E TELHADO CONJUGADO: EDIFICAÇÃO 2. ....	79
FIGURA 32 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 2. ....	80
FIGURA 33 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE : EDIFICAÇÃO 2.....	81
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 2.....	84
FIGURA 35 – DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 2. ....	85
FIGURA 36 – DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 2.....	86
FIGURA 37 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 3. ....	87
FIGURA 38 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE: EDIFICAÇÃO 3.....	88
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 3.....	92
FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 3.....	94
FIGURA 41 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 3.....	94
FIGURA 42 - TELHADO COM VEGETAÇÃO: EDIFICAÇÃO 4. ....	96
FIGURA 43 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 4. ....	97
FIGURA 44 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE : EDIFICAÇÃO 4.....	98
FIGURA 45 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 4.....	102
FIGURA 46 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 4.....	103
FIGURA 47 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 4.....	104

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS. ....	54
QUADRO 2 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A1. ....	61
QUADRO 3 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A2. ....	62
QUADRO 4 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A3. ....	63
QUADRO 5 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A4. ....	64
QUADRO 6 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM Gemini. ....	65
QUADRO 7 - COORDENADAS PAQ A1 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	67
QUADRO 8- COORDENADAS PAQ A2 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	68
QUADRO 9 - COORDENADAS PAQ A3 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	69
QUADRO 10 - COORDENADAS PAQ A4 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA. ....	70
QUADRO 11 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 1. ....	72
QUADRO 12 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 1. ....	74
QUADRO 13 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 1. ....	74
QUADRO 14 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO: EDIFICAÇÃO 1. ....	75
QUADRO 15 - ÁREA DEFINIDA PELOS CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 1. ....	76
QUADRO 16 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 1. ....	77
QUADRO 17 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 2. ....	80
QUADRO 18 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 2. ....	82
QUADRO 19 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 2. ....	82
QUADRO 20 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO: EDIFICAÇÃO 2. ....	83
QUADRO 21 - ÁREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 2. ....	84
QUADRO 22 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 2. ....	85
QUADRO 23 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM: ....	88
QUADRO 24 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 3. ....	89
QUADRO 25 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 3. ....	90
QUADRO 26 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO: EDIFICAÇÃO 3. ....	91
QUADRO 27 - ÁREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 3. ....	93

QUADRO 28 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 3.....	93
QUADRO 29 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM:.....	97
QUADRO 30 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 4. ....	99
QUADRO 31 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA : EDIFICAÇÃO 4. ....	100
QUADRO 32 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO: EDIFICAÇÃO 4. ....	101
QUADRO 33 - AREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 4. ....	102
QUADRO 34 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 4.....	103

## LISTA DE SIGLAS

ALS	- Airborne Laser Scanning
ASPRS	- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
DGPS	- Differential Global Position System
GNSS	- Global Navigation Satellite System
GPS	- Global Position System
IDW	- Inverse Distance Weighted
IMU	- Inertial Measurement Unit
INS	- Inertial Navigation System
ISPRS	- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	- Light Detection and Ranging
MATLAB	- Matrix Laboratory
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MLS	- Mobile Laser Scanning
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
POS	- Position and Orientation System
RADAR	- Radio Detection And Ranging
RANSAC	- Random Sample Consensus
RIT	- Red Irregular de Triangulas
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
TIN	- Triangulated Irregular Network
TLS	- Terrestrial Laser Scaninng
UTM	- Universal Transverse Mercator
WGS	- World Geodetic System

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 HIPÓTESE .....	18
1.3 OBJETIVO GERAL .....	18
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 TECNOLOGIA LIDAR .....	20
2.2 LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO .....	22
2.3 PROCESSAMENTO DE DADOS ALS .....	24
2.4 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO.....	26
2.4.1 Representação por Modelos de Objetos .....	27
2.4.1.1 Níveis de Representação .....	28
2.4.1.2 Modelo Baseado na Teoria Gestalt .....	29
2.4.2 Métodos de Detecção.....	32
2.4.2.1 Método “Model-Driven” .....	35
2.4.2.2 Método “Data-Driven” .....	35
2.4.2.2.1 Transformada de Hough 3D .....	36
2.4.2.2.2 Algoritmo de RANSAC .....	37
2.4.2.2.3 Crescimento de Regiões.....	38
2.4.2.2.4 Técnica Douglas-Peucker.....	40
2.4.3 Procedimentos Adicionais .....	42
2.4.3.1 Ajustamento de dados numa Reta.....	42
2.4.3.2 Triangulação de Delaunay .....	44
3 METODOLOGIA.....	46
3.1 DEFINIÇÃO DA AREA DE INTERESSE .....	47
3.2 SEGMENTAÇÃO DE PONTOS LIDAR .....	48
3.2.1 Filtro de Altura .....	48
3.2.2 Triangulação.....	49
3.2.3 Obtenção de Regiões.....	49
3.2.4 Obtenção de Segmentos.....	50
3.3 DEFINIÇÃO DO CONTORNO.....	52
3.4 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE .....	56

4 MATERIAIS UTILIZADOS .....	59
4.1 RECURSOS DE EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS .....	59
4.2 AREAS DE ESTUDOS .....	59
5 EXPERIMENTOS E Análise DE RESULTADOS.....	66
5.1 PONTOS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE - PAQ.....	66
5.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS .....	71
5.2.1 Experimento 01 - Edificação 1 .....	71
5.2.1.1 Obtenção de Regiões - Edificação 1 .....	71
5.2.1.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 1.....	72
5.2.1.3 Obtenção do Contorno - Edificação 1 .....	73
5.2.2 Experimento 02 - Edificação 2.....	78
5.2.2.1 Obtenção de Regiões - Edificação 2 .....	78
5.2.2.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 2.....	80
5.2.2.3 Obtenção do Contorno - Edificação 2 .....	81
5.2.3 Experimento 03 - Edificação 3.....	86
5.2.3.1 Obtenção de Regiões - Edificação 3 .....	87
5.2.3.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 3.....	87
5.2.3.3 Obtenção do Contorno - Edificação 3 .....	89
5.2.4 Experimento 04 - Edificação 4.....	95
5.2.4.1 Obtenção de Regiões - Edificação 4 .....	95
5.2.4.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 4.....	97
5.2.4.3 Obtenção do Contorno - Edificação 4 .....	98
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	105
6.1 CONCLUSÕES .....	105
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106

## 1 INTRODUÇÃO

A Fotogrametria pode ser definida como sendo a arte, ciência e tecnologia que visa à obtenção de informações confiáveis da superfície terrestre com o uso de imageadores. Assim, a utilização de dados provenientes de um levantamento aéreo laser scanner para o propósito da reconstrução geométrica de edificações pode ser considerada como uma aplicação dentro do domínio dessa ciência. De forma similar, a ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) em 2009 complementou que a Fotogrametria não se limitava no uso de imagens convencionais, mas também das adquiridas de sensores remotos multi-espectrais, RADAR (*Radio Detection And Ranging*) e LIDAR (*Light Detection And Ranging*).

Tradicionalmente a obtenção de informações cartográficas urbanas é realizada com técnicas de restituição estereofotogramétrica. Devido ao alto custo do processo e elevado tempo necessário para a extração manual das informações tridimensionais das edificações, procedimentos automáticos e semiautomáticos para extração e reconstrução de edificações têm sido desenvolvidos. (DIEZ *et al.*, 2008).

A extração automática de informação de objetos urbanos com o uso de dados adquiridos por ALS (*Airborne Laser Scanning*) tem sido um importante tópico de pesquisa em Fotogrametria nas ultimas duas décadas (MAYER, 2008). Dados tridimensionais obtidos por ALS são especialmente adequados para esta tarefa, pois eles descrevem diretamente a superfície dos objetos em três dimensões. Neste contexto, a classificação da nuvem de pontos para a reconstrução geométrica pode ser considerada como sendo uma das etapas mais importantes. (NIEMEYER *et al.*, 2011).

A classificação automática de uma nuvem de pontos de um levantamento lidar, pode ser considerada como sendo o resultado obtido de um conjunto de algoritmos matemáticos que separam diferentes classes de objetos, por exemplo, pontos associados a telhados, arvores, terrenos, etc.



Dentro dos principais métodos usados para fazer uma classificação da nuvem de pontos LIDAR é possível mencionar métodos como: Método de Detecção de bordas (HEATH *et al.*, 1998), Método de Crescimento de Superfícies (LEE e SCHENK, 2002), Método da Linha de Varredura (SITHOLE e VOSSSELMAN, 2003), Método de Aglomeração (ROGGERO, 2001) e Método de Partição por Grafos (KIM e MULLER, 1999).

Uma das atividades mais importantes do mapeamento urbano é a reconstrução de edificações da mesma forma como a extração dos contornos das edificações. Essa tarefa tem sido realizada tradicionalmente com o auxílio da cognição humana empregando imagens aéreas ou orbitais por meio de restituições monoculares ou estereoscópicas. A automação do processo tem sido vastamente pesquisada nas últimas décadas. Entretanto, os métodos que integram imagens com dados de varredura laser têm-se mostrados mais eficientes daqueles que utilizam somente imagens. A extração automática do contorno de edificações na imagem será facilitada se o contorno aproximado for previamente realizado com o auxílio dos dados laser. A extração automática do contorno com dados laser apresenta maior facilidade, pois os dados laser permitem a definição geométrica aproximada da edificação.

Embora exista um número elevado de pesquisas já realizadas com a temática de definição de contornos de edificações urbanas com o uso de dados laser scanner (MACHADO, 2006; LI; LI e CHAPMAN, 2007; VOSSSELMAN, 2009; DOS SANTOS *et al.*, 2011; GALVANIN e DAL POZ, 2012; FAZAN e DAL POZ, 2013). Existem dificuldades na definição do contorno, devido às variedades de telhados (número de águas, diferentes alturas, etc.), e à presença de outros objetos na área varrida (árvores, postes, etc.). Estes fatores ocasionam, em parte, que os métodos desenvolvidos ainda não possuam eficiência equivalente à extração manual.

O interesse dessa temática, pela comunidade científica internacional foi enfatizado em março de 2011 quando a Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) apresentou o projeto **ISPRS, Benchmark on Urban Object Classification and 3D Building Reconstruction**, com o propósito de comparar diferentes técnicas para detectar objetos urbanos (edificações, árvores, estradas, auto,etc.) e reconstruir edificações (em 3D, planos e somente contornos). Para a realização dos experimentos, os dados disponíveis foram imagens aéreas digitais de alta resolução, parâmetros de orientação, nuvem de pontos de um levantamento aéreo LIDAR e MDS da região. Os dados são das localidades em Vaihingen, Alemanha e Toronto, Canadá.

Em 2012 na Austrália, oito centros de pesquisa apresentaram resultados preliminares. Os centros foram: University of Calgary - Canadá, Fraunhofer Inst. Ettlingen - Alemanha, University of Hannover - Alemanha, University of Ljubljana - Eslovênia, Tongji University - Japão, TU Munich - Alemanha, TU Vienna - Áustria e Wuhan University - China. A avaliação de acuracidade da classificação foi baseada nos indicadores de completeza, exatidão e qualidade. A avaliação de acuracidade geométrica foi realizada pela análise do erro quadrático meio das distâncias associadas à extração de contornos com respeito a outros de referência. Os resultados foram considerados bons quando o indicador de completeza for maior que 70% e o indicador de exatidão maior ou igual a 85%.

Os principais métodos usados na detecção de objetos urbanos são: regras de classificação, operações morfológicas, classificação de contornos poligonais, classificação de campos randômicos condicionais, suavização, Transformação de Hough, máscaras de objetos, redes neurais e mínimos quadrados. Os métodos usados na reconstrução de edificações em 3D são: detecção de contornos, triangulação de Delaunay, representação por adjacência de grafos, RANSAC, agrupamento de vetores normais, operador de regularização, princípio de mínimo comprimento descritivo e máxima regularidade geométrica.

Finalizando, as conclusões apresentadas no projeto sobre a extração de objetos urbanos, baseadas em comparações entre os diferentes métodos, salientam que a maioria das metodologias desenvolvidas são satisfatórias na detecção e reconstrução de edificações isoladas e maiores de 50m<sup>2</sup>. Entretanto, nas edificações não isoladas, pequenas e com telhados com diferentes planos de cobertura, os algoritmos apresentam falhas de reconstrução e delineamento do contorno. As falhas na reconstrução 3D são expressivas na presença de edificações de alta qualidade em ambientes urbanos complexos. Em particular, nenhum método apresentado, explorou completamente o potencial da acuracidade inerente aos dados associados ao sensor.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Considerando que atualmente mais de 50% da população mundial vive nos centros urbanos, as pesquisas relacionadas com a extração de informações sobre as edificações são cada vez mais importantes para o planejamento urbano relacionado com o transporte público, dimensionamento de rede de energia elétrica, tributação, telecomunicações, etc.

Uma das formas mais tradicionais de representação cartográfica de uma edificação no mapeamento urbano, com aplicação em várias áreas das engenharias, consiste na representação de seu contorno. Atualmente, mesmo com o grande avanço da Fotogrametria Digital, a extração do contorno tem sido realizada, na grande maioria das aplicações, com técnicas de restituição baseada na cognição humana. Essa condição deixa evidente que embora o homem tenha trabalhado intensamente com pesquisas e desenvolvimentos, em mais de 30 anos, a solução de um procedimento automático que substitua com eficiência a capacidade humana nesse tipo de mapeamento, ainda não foi criada. Assim, pesquisas relacionadas com essa temática são ainda importantes para o desenvolvimento dessa área tanto a nível nacional e internacional.

Como já mencionado anteriormente, a importância dessa temática de pesquisa pode ser comprovada a nível mundial através da chamada para a realização do projeto organizado pela ISPRS em 2011, denominado “**ISPRS test project on urban classification and 3D Building Reconstruction**” onde a comunidade científica foi convidada para realizar classificações, representações e reconstruções de edificações com metodologias automáticas e semiautomáticas para apresentação e discussões em eventos científicos internacionais da área.

Fundamentada nesse interesse pela procura de métodos para a detecção e reconstrução de edificações este trabalho de mestrado realizará o estudo de extração de contornos de edificações usando pontos LIDAR.

## 1.2 HIPÓTESE

Se os dados obtidos resultado da varredura sobre edificações são discretos, então a extração dos contornos será através de métodos de análise de feições lineares e de conectividade.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um procedimento de extração semiautomático de contornos de telhados de edificações empregando somente a nuvem de pontos tridimensionais oriunda de um levantamento aéreo laser scanner.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos:

- Fazer um reconhecimento manual das nuvens de pontos associadas às áreas em estudo.
- Detectar as águas dos telhados das edificações empregando técnica de crescimento de regiões aplicada na nuvem.
- Segmentar a nuvem resultante e modelar os contornos das águas do telhado.
- Reconstruir o contorno do telhado por meio do agrupamento perspectivo.
- Realizar uma digitalização manual dos vértices das edificações estudadas, empregando a imagem hipsométrica para avaliar o método semiautomático.
- Representar graficamente os contornos resultantes do método proposto e avaliar numericamente por meio de indicadores de qualidade.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 TECNOLOGIA LIDAR

Segundo Fisher *et al.* (2005) num contexto da visão computacional o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é uma fonte de luz brilhante usada frequentemente para as aplicações em visão de máquina devido a suas propriedades: frequência espectral, coerência, divergência do feixe pequena. A medição de distância e triangulação com a luz estruturada são duas aplicações usuais do LASER em Ciências Geodésicas. A luz estruturada é um sistema que ilumina um objeto, a partir de um ângulo conhecido, com um padrão específico na triangulação. Maiores detalhes sobre a tecnologia LASER, consultar (SVELTO e HANNA, 2010).

Outra parte importante num sistema LIDAR é o sensor de distância (*range sensor*) LASER, definido em Fisher *et al.* (2005) como um sistema baseado na tecnologia a qual geralmente usa a triangulação de luz estruturada. O tempo total de viagem calculado de ida e volta do pulso óptico ou acústico é denominado como sendo tempo de voo.

Portanto se define LIDAR como o sensor de distância que habitualmente usa a luz LASER. O sistema calcula o tempo de voo pertencente a um pulso de luz laser ou o deslocamento de fase de uma onda contínua, *waveform*. O tipo de informação obtida (*range data*), resultado da varredura, é um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais. Esta informação é usualmente conhecida como sendo uma nuvem de pontos (FISHER *et al.* 2005). Geralmente o termo LIDAR está associado a um sistema laser scanner aéreo (sistema montado numa plataforma aérea).

Para Vosselman (2008) LIDAR é uma tecnologia de levantamento aéreo topográfico cujas vantagens são a aquisição rápida e detalhada de coordenadas pontuais da superfície levantada gerando uma nuvem de pontos. LIDAR é uma tecnologia usada em diferentes tipos de trabalhos de engenharia bem como pesquisas em Geomática e muitas vezes é conhecido como LIDAR altimétrico. Para os outros tipos de uso ver (FUJII e FUKUCHI, 2005).

Inicialmente os equipamentos que usavam LIDAR não tinham a capacidade de efetuar levantamento de pontos com coordenadas tridimensionais, permitindo somente a determinação de perfis altimétrico. Neste caso eram chamados de perfiladores (*profile laser*). Esta tecnologia atingiu a capacidade de varredura e com o avanço da tecnologia GPS/INS foi possível a determinação de pontos num referencial geodésico tridimensional, viabilizando a definição geométrica de relevo e de entidades cartográficas na superfície terrestre.

De forma geral, um sistema de varredura por laser, conhecido como *laser scanner*, permite a obtenção da informação da radiação refletida de uma posição pontual levantada e a determinação da distância entre esse ponto medido com a plataforma do dispositivo da unidade laser. Um laser scanner típico pode ser subdividido nas seguintes unidades: unidade laser de medição de distância (*laser range finder*), o sistema de varredura óptico mecânico e a unidade de controle e processamento (WEHR e LOHR, 1999).

Um sistema de varredura pode ser instalado em três diferentes plataformas. O primeiro é laser scanner terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS) faz uso do laser scanners, usado usualmente sobre um tripé, efetua medidas em três dimensões (distância e duas angulares) fundamenta-se na medição do tempo de voo com uso de radiação laser pulsado ou de onda contínua modulada. O segundo tipo é laser scanner aéreo (Airborne Laser Scanning, ALS) onde o dispositivo é instalado em qualquer veículo aéreo. O terceiro é laser scanner móvel (Mobile laser scanning, MLS) onde o dispositivo laser é instalado em veículos terrestres.

## 2.2 LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO

Vosselman (2008) afirma que os sistemas laser em plataformas aéreas usam as unidades laser de medição de distância que emitem e detectam os pulsos laser refletidos pela superfície da terra e outros objetos. O tempo que transcorre entre a emissão e detecção do pulso é multiplicado pela velocidade da luz para obter a distância entre a unidade laser de medição de distância e o objeto. Esta distância junto com a posição/orientação da plataforma aérea, direção e sentido do feixe laser e parâmetros de posicionamento e orientação do sensor laser na plataforma viabilizam a determinação tridimensional (geodésica) de pontos levantados na superfície terrestre.

Segundo Tiwari e Pande (2011) os sistemas ALS produz uma nuvem de pontos onde cada ponto possui coordenadas tridimensionais num referencial geodésico ou cartográfico, determinados com a combinação de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), IMU (*Inertial Measurement Unit*) e a unidade laser de medição de distância. Adicionalmente às coordenadas dos pontos possuem valores de intensidade de retorno do pulso. Os valores de intensidade são armazenados em números digitais e representam os valores de energia que regressa ao detector de cada ponto imageado.

O resultado do levantamento laser scanner consiste de uma nuvem de pontos tridimensional quase aleatória. Os pontos têm informação posicional: duas coordenadas X e Y planimétricas e Z altimétrica (AXELSSON, 1999). A característica quase randômica significa que somente o feixe e não os fótons individualmente podem ser direcionados aos objetos ou às feições na superfície levantada (BOUWMEESTER, 2004).



Em forma geral a configuração do sistema ALS engloba as seguintes componentes (Shan e Toth, 2008):

- I. Um Dispositivo laser de medição de distância (*laser range finder*): Esta unidade compreende do equipamento LASER e um sistema óptico de transmissão e recepção. No receptor estão inclusos o detector, o contador temporal e a unidade de digitalização;
- II. Um Sistema de Varredura laser contendo o espelho rotativo junto com o codificador angular, cuja função, na maioria dos casos, é realizar a varredura do terreno na direção perpendicular à trajetória;
- III. Uma unidade eletrônica contendo vários elementos hardware com funções de processamento e controle do sistema em geral;
- IV. Um sistema de orientação e posicionamento, constituído pelos sistemas GPS (*Global Position System*) e IMU (*Inertial Measurement Unit*). Utiliza tradicionalmente o método de posicionamento DGPS (*Differential Global Position System*). Este método apoia-se em dois receptores GPS. Um receptor GPS encontra-se numa estação de referência em terra cujas coordenadas são conhecidas e um segundo receptor na aeronave. O IMU é uma unidade que determina os ângulos de atitude do sensor durante o levantamento. A integração do sistema GPS com a IMU permite determinar precisamente a posição e orientação da plataforma no instante da varredura de um ponto laser.
- V. Em forma geral, tem-se um software para controlar a operação de cada elemento importante do sistema associado à gravação, armazenamento e processamento preliminar da informação, resultado da varredura da área de interesse. Um pós-processamento é necessário para obter a nuvem de pontos LIDAR.
- VI. Adicionalmente, têm-se sensores de imagem, tais como: câmeras digitais ou vídeo câmeras.

## 2.3 PROCESSAMENTO DE DADOS ALS

Como é apresentado em Wehr e Lohr (1999) existem três tipos de informações básicas que são empregadas para o cálculo de coordenadas tridimensionais de pontos determinados pelo sistema ALS. O primeiro é o conjunto de dados que descrevem a posição e orientação do sensor no instante da varredura de cada ponto, também conhecido como POS (*Position Orientation System*). O segundo conjunto de dados está relacionado com as distâncias medidas pelo laser e os ângulos de varredura dos pontos medidos instantaneamente. O terceiro conjunto está relacionado com os parâmetros obtidos no procedimento da calibração do sistema o qual é fornecido pela empresa responsável pelo equipamento.

Os três conjuntos de dados, anteriormente mencionados, contribuem no cálculo da nuvem de pontos no sistema geodésico WGS 84. A próxima etapa a ser realizada consiste na transformação das coordenadas dos pontos no sistema WGS 84 para um sistema de coordenadas geodésico nacional.

Segundo Hu (2003) A tecnologia associada ao ALS não fornece uma solução no processamento em tempo real, acarretando uma grande quantidade de trabalho na fase de pós-processamento. Existem várias metodologias e algoritmos que foram desenvolvidas para a extração de somente pontos LIDAR sobre regiões de interesse. Existem algoritmos baseados somente na informação posicional, outros na informação posicional e de intensidade. O desenvolvimento de metodologias automáticas ou semi-automáticas para a classificação de feições específicas na superfície terrestre tem sido investigado constantemente. A maioria dos algoritmos usam técnicas básicas como Filtragem, Segmentação, Classificação, Interpolação, Modelagem, Suavizadores e Interação Humana.

A filtragem usualmente consiste em remover dados indesejáveis, ou separar somente pontos que foram levantados na superfície de um objeto de interesse ou um conjunto de pontos não pertencentes a ele. Para distinguir os pontos pertencentes a edificações e árvores daqueles pertencentes somente ao terreno usualmente são utilizados os filtros morfológicos, funções estatísticas ou funções de peso. Além disso, a nuvem de pontos bruta pode ser processada para remover pontos não pertencentes a uma classe de interesse, conservando as descontinuidades entre as superfícies.

A segmentação consiste na separação de um conjunto de pontos que são descritos por meio de uma geometria associada ou características radiométricas. Emprega-se para isso valores de limiares, agrupações ou algoritmos de organização percentual. Por exemplo, edificações isoladas podem ser detectadas por meio da comparação de limiares de elevação.

A classificação é usada para distinguir, entre várias categorias, objetos presentes no terreno. O propósito é agrupar estes objetos em diferentes classes de grupos de pontos, empregando algoritmos de reconhecimento de padrões, tais como o classificador de “Bayes” ou “k-means”. A descrição de forma de objetos pode ser usada para a distinção entre pontos pertencentes a uma vegetação ou edificações.

A interpolação pode ser definida como sendo um procedimento matemático que permite determinar a elevação ou altura de uma posição planimétrica conhecida. Os métodos de interpolação empregam um conjunto específico de pontos ou por meio da representação das características da nuvem de pontos no formato *raster*. Os métodos de interpolação usados comumente empregam uma organização dos pontos na forma de triângulos (*Triangular Irregular Networks* – TIN). Os métodos de interpolação mais populares no caso de imagens *raster* baseiam-se em funções matemática denominadas de vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

A Modelagem da superfície do terreno ou um objeto necessita de informações geométricas de suas formas. Geralmente, as superfícies do terreno são aproximadas como sendo uma superfície contínua e suave; são frequentemente definidas por meio de uma estrutura de triângulos (TINs). Os objetos são descritos em termos de seus atributos geométricos usando modelos paramétricos, prismáticos e poliédricos os quais podem ser convertidos numa representação esquemática “*wireframe*” ou modelos “CSG” combinando várias primitivas.

A Suavização pode-se considerada como sendo um procedimento que permite eliminar ruído aleatório ou que produz uma região mais suave com contornos melhorados. Este é um processo iterativo que compara um ponto isolado com pontos contíguos ajustando suas propriedades.

A Interação Humana é um mecanismo que utiliza os conhecimentos humano com interfaces da computação. Os sistemas completamente automáticos podem falhar em tarefas complexas com a utilização de dados LIDAR devido a escassez de informações necessárias ao reconhecimento. Os operadores humanos podem classificar facilmente diferentes tipos de terreno, selecionar pontos sementes ou posicionar e construir a delineação de edificações.

## 2.4 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

Em Brenner (2003) são apresentados três princípios básicos que estão presentes na maioria de sistemas de extração de objetos feitos pelo homem: A representação dos modelos de objetos, a detecção/reconhecimento dos objetos e a medição da informação geométrica.

A representação através de modelos de objetos pode ser genérica ou específica. No contexto de reconstrução de objetos feito pelo homem, o uso de modelos específicos é usualmente impossível devido à grande variedade de objetos no mundo real.

Os objetos genéricos simples são descrições paramétricas onde a forma geral é fixa, porém os parâmetros geométricos como a posição, altura, largura, profundidade e o ângulo podem ser ajustados. Além disso, os modelos baseados sobre a teoria “Gestalt” (*Gestalttheorie*) podem ser considerados como sendo modelos genéricos complexos onde as propriedades de vizinhança, proximidade, continuidade e simetria são usadas para reconhecer as estruturas.

A detecção/reconhecimento é o procedimento fundamental no problema de reconhecimento de objetos. Diferentes regras de controle podem ser identificadas tais como a *bottom-up (data-driven)*, *top-down (model-driven)* e abordagens híbridas.

A Medição da Informação Geométrica esta associada às características como posição, orientação e tamanho dos objetos reconhecidos. Este é um passo geralmente não requerido no reconhecimento de objetos, mas está naturalmente presente na extração de objetos para sistemas de geoinformação.

#### 2.4.1 Representação por Modelos de Objetos

Dentro das diferentes abstrações geográficas, Goodchild (1992) identifica dois grupos: modelos de campos e modelos de objetos. Os modelos de campos representam o espaço geográfico como uma superfície ou campo. Um modelo de objetos representam entidades discretas no espaço.

Com relação à extração de edificações, para Sohn (2004) existem dois modelos de edificações para representação das edificações: o específico e o genérico. A modelagem de uma edificação específica assume que os contornos da maioria das edificações podem ser reconstruídos por simples retângulos o paralelogramos. No caso da modelagem da edificação genérica reconstrói-se a forma da edificação sem usar modelos preestabelecidos, mas recompilando características geométricas e excluindo informação detalhada do contorno.

#### 2.4.1.1 Níveis de Representação

De acordo com Wang (2008) devido à eficiência da captura de informação 3D, o sistema LIDAR tem ganhado uma alta popularidade em estudos de reconstrução de edificações 3D nos recentes anos. Um modelo de edificação 3D é uma representação virtual, mais o menos abstrata de uma edificação real, numa determinada escala. A resolução de um modelo representa a aproximação entre o modelo e a edificação real. A (FIGURA 1) mostra cinco diferentes resoluções ou níveis de detalhes (*LoD - Level of details*) para os modelos de edificações 3D. LoD0 é simplesmente um DSM. LoD1 é uma estrutura de blocos de edificações sem informação dos telhados. LoD2 é uma estrutura de blocos junto com os detalhes dos telhados. LoD3 fornece a informação detalhada das fachadas. LoD4 permite navegar dentro dos modelos.

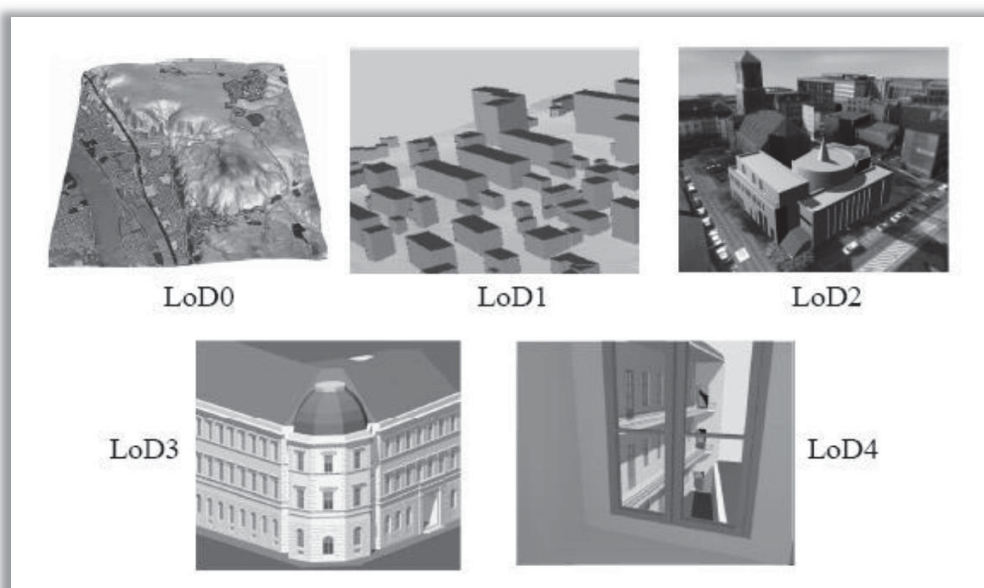


FIGURA 1 - NÍVEIS DE DETALHES DE MODELOS DE EDIFICAÇÕES.

FONTE: Yang (2008)

A modelagem de edificações 3D gerada a partir de dados LIDAR é geralmente associada aos modelos LoD2. Extrair atributos geométricos dos telhados da edificação é o principal interesse nas pesquisas sobre LIDAR para a modelagem de edificações 3D. A detecção das edificações a partir da informação inicial é geralmente o primeiro passo para a reconstrução do modelo 3D. Os métodos baseados no DSM normalizado são os mais comuns para extrair edificações da informação LIDAR em forma direta.

#### 2.4.1.2 Modelo Baseado na Teoria Gestalt

Em Lowe (1984) tem-se uma organização perspectiva (*perceptual organization*) que simula a capacidade básica do sistema visual humano na obtenção de agrupações ou estruturas importantes de uma imagem sem conhecimento a priori do seu conteúdo. Um principal requisito do processo de reconhecimento é que a organização perspectiva deverá distinguir, com acuracidade, as agrupações significativas que emergem de um ponto de vista ou posição.

A teoria Gestalt investiga o estudo da percepção e o estudo do fenômeno do agrupamento perspectivo. A palavra Gestalt significa "Todo" ou "Configuração". A principal fundamentação dos Gestaltistas foi considerar que a percepção é algo que acontece como um todo e não como uma combinação dos atributos primitivos individuais. A manifestação do agrupamento de fenômenos é caracterizada com base em seis principais propriedades: A proximidade - elementos próximos tendem a serem agrupados juntos. A semelhança - elementos que tenham atributos físicos similares como cor, orientação ou tamanho são agrupados. A continuidade - elementos que se estende ao longo de uma linha comum ou numa curva suave são agrupados. O fechamento - existe a tendência para curvas agrupar elementos comuns. A simetria - os elementos que têm simetria bilateral em relação a um eixo são agrupados. A familiaridade - elementos são agrupados quando existe um costume ou uma familiaridade de vê-los juntos.

Em Bilen (2004) tem-se a técnica de agrupamento perspectivado para reconstruir as bordas retangulares das edificações como parte de uma metodologia para extrair edificações em imagens aéreas. As leis Gestalt foram ajustadas para que segmentos de retas sejam agrupados. Na (FIGURA 2) apresenta-se o estágio da geração de segmentos de retas. Se os pontos extremos de dois segmentos estão a uma distância (*gap*) e esta é menor do que um limiar (*DIST*) definido, então os segmentos são conectados para forma uma única linha. A característica de conexão entre os segmentos esta em conformidade com a lei de fechamento definida na teoria Gestalt.

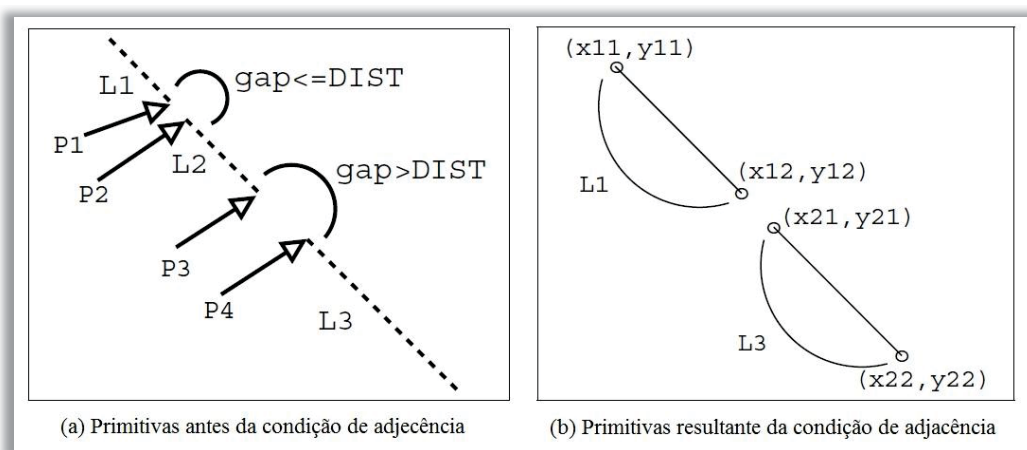


FIGURA 2 - UNIÃO PELA CONDIÇÃO DE FECHAMENTO.

FONTE: Adaptada de Bilen (2004)

A geração da forma retangular é efetuada com base na formação de esquinas. Na (FIGURA 3) amostra a obtenção de uma esquina, representadas por um par de segmentos de retas perpendiculares e adjacentes. A característica de adjacência definida entre os pontos extremos dos segmentos esta em conformidade com a lei de proximidade definida na teoria Gestalt.



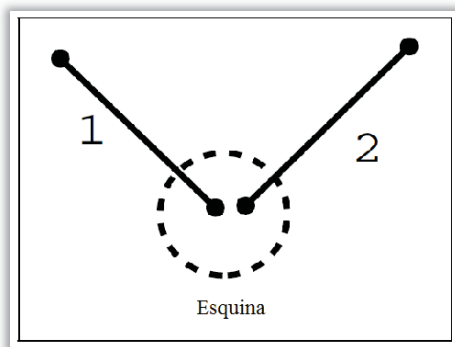


FIGURA 3 - DETECÇÃO DE ESQUINAS

FONTE: Adaptada de Bilen (2004)

Se quatro esquinas são detectadas, os quais são parte de um retângulo, então estas quatro esquinas representam uma edificação retangular. Contudo, encontrar as quatro esquinas, com base em dados pontuais, nem sempre é possível. Por tanto, a geração do retângulo efetuada com pares de esquinas satisfaz a condição de simetria ou paralelismo, conforme a lei de simetria na teoria Gestalt. Todas as esquinas são desenhadas até que a edificação retangular é detectada como é apresentado nas (FIGURA 4) e (FIGURA 5).

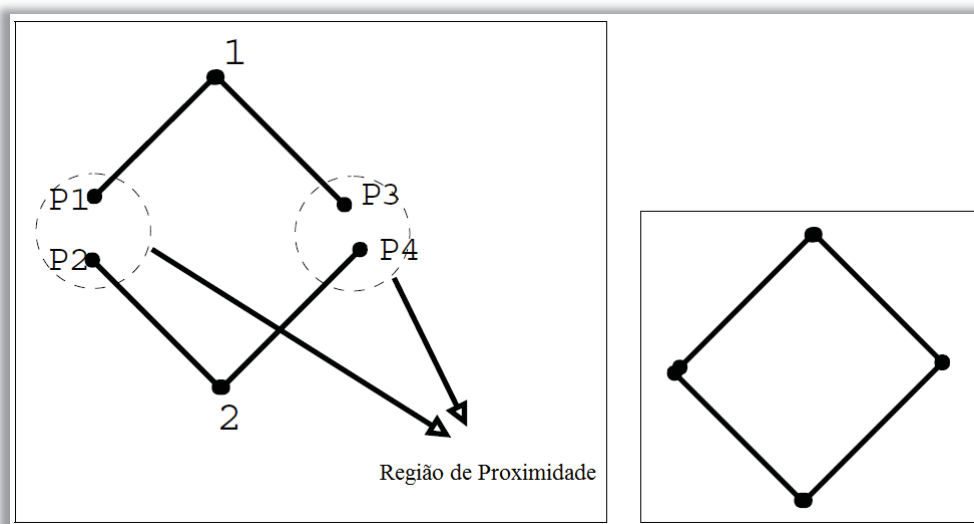


FIGURA 4 - SIMETRIA NA CONSTRUÇÃO DE CONTORNOS RECTANGULARES

FONTE: Adaptada de Bilen (2004)

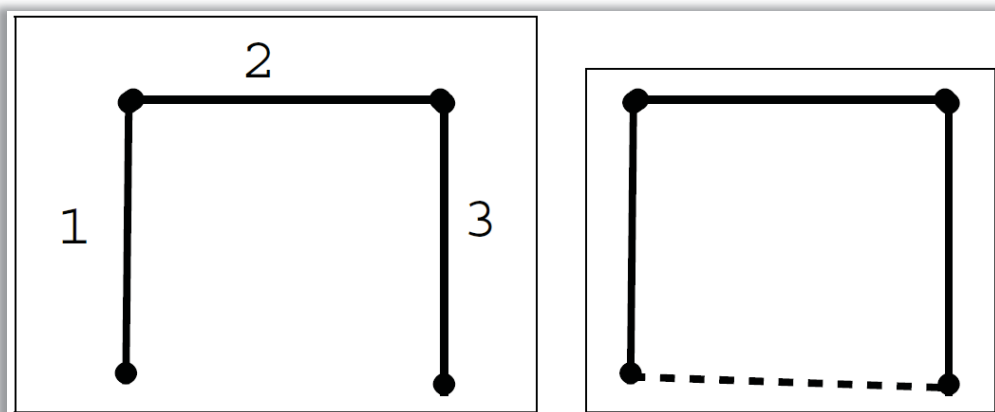


FIGURA 5 - PARALELISMO NA CONSTRUÇÃO DE CONTORNOS  
RECTANGULARES

FONTE: Bilen (2004)

#### 2.4.2 Métodos de Detecção

O propósito da detecção de objetos com ferramentas computacionais é localizar um determinado objeto presente numa determinada região que foi amostrada por um conjunto de geoinformações. Eventualmente a aparência e forma são também propriedades importantes. Por outro lado, a finalidade do reconhecimento determinará o tipo específico do objeto a ser localizado (CYGANNEK, 2013).

De acordo com Wan e Shang (2009) os sistemas ALS são apropriados para a detecção de edificações e reconstrução de edificações, enquanto os sistemas laser scanner terrestres permitem a captura de detalhes, tais como elementos estruturais e tipos de fachas de edificações. Geralmente, a detecção de edificações é um processo de segmentação, no qual os pontos pertencentes às edificações são separados dos outros presentes no terreno, árvores e outros objetos. Há três maneiras diferentes de classificar os métodos de processamento de dados Lidar para a detecção de edificações.

Na primeira, a classificação esta baseada nos métodos de segmentação “*Part-type*” e “*Patch-type*”. O método “*Part-type*” segmenta os dados LIDAR para obter objetos simples, visualmente significativos por meio da extração de feições geométricas primitivas. Os objetos obtidos são descritos pelos parâmetros matemáticos associados. O método “*Patch-type*” segmenta a nuvem de pontos para conseguir regiões homogêneas recorrendo ao estudo de características de similaridade de parâmetros estimados numa região. Estas regiões são classificadas e organizadas em estruturas significativas. Este método possui melhor desempenho quando aplicado na classificação de pontos obtidos por um equipamento laser scanner terrestre.

A segunda classificação esta baseada nas formas de representar regiões homogêneas. A classificação está baseada no contorno ou na superfície. O método baseado em contornos define os contornos de diferentes regiões em relação a uma propriedade geométrica. Por tanto o conjunto de pontos dentro dos contornos definidos produz a segmentação final. O método baseado em superfícies usam propriedades geométricas locais como medidas de similaridade para segmentar. Os pontos próximos e que têm propriedades similares são unidos para formar as diferentes regiões e a partir dessas os contornos são definidos.

A terceira classificação esta apoiada em cinco técnicas ou métodos matemáticos: Métodos de detecção de contornos (*Edge-Detection methods*), Métodos de crescimento de superfícies (*Surface-Growing methods*), Métodos de linha de varredura (*Scan-line methods*), Métodos de Agrupamento (*Clustering methods*) e Métodos de particionamento usando Grafos (*Graph partitioning methods*).

O método de detecção de contornos (*Edge-Detection method*), baseado na segmentação em imagens, inicialmente transforma os dados tridimensionais pontuais LIDAR numa imagem (*range image*). Os contornos são detectados através da análise de descontinuidades nas diferentes regiões existentes na imagem. No caso de reconhecimento de telhados de edificações usando LIDAR aéreo, os objetos como superfícies de telhados de diferentes alturas, chaminés, galhos de árvores e outros objetos produzem uma classificação incorreta. A operação de converter dados 3D em imagens de distância causa perda da informação.

O método de crescimento de superfícies (*Surface Growing method*) na nuvem de pontos se comporta de maneira parecida ao processamento com imagens. Inicialmente definem-se sementes baseadas em características geométricas. Frequentemente são empregados métodos robustos para detectar planos, tais como a Transformada de Hough ou o Ajustamento de Mínimos Quadrados. Informações sementes são definidas para agrupar pontos em função de mensurações de similaridade como: proximidade, declividade, curvatura e normais de superfícies. A obtenção de diferentes sementes pode levar a diferentes tipos de segmentação; portanto, a má seleção de sementes pode ser um problema para o método.

O método de Linha de Varredura (*Scan-line*) é um processamento que analisa informações geométricas ao longo de uma determinada direção da linha de varredura ou scanner. De forma geral, uma linha de varredura é uma polinha. Uma polinha é a união dos extremos de segmentos de reta. O procedimento inicia-se com a partição de estas polilinhas em segmentos. Após da segmentação, os segmentos são unidas por meio de mensurações de similaridade. O método é empregado principalmente para extrair superfícies planas.

O método de Aglomeração (*Clustering*) emprega medidas geométricas ou radiométricas. As técnicas mais usuais são “*k-means*”, “*maximum likelihood*” e “*fuzzy-clustering*”. A diferença com outros métodos é que o processamento engloba toda a nuvem de pontos.

O método de Partição por Grafos (*Graph Partitioning*) utiliza grafos de proximidade. Um grafo de proximidade é um atributo grafo  $G(V,E)$ . O conjunto  $V$  representa os nodos e  $E$  representa o conjunto de conexões entre um par de pontos. Os nodos, próximos a um nodo  $V_i$ , representam a vizinhança do nodo  $V_i$ . Cada ponto tem um peso para medir a similaridade entre um par de pontos. As características de similaridade comumente usadas são: Adjacência, Inclusão, Conectividade e a Área Relativa.

Em Habib, Kwak e Al-Durgham (2011) mostra duas abordagens de modelagens de edificações com uso de informação LIDAR resultado de um aerolevantamento. Estas duas metodologias foram denominadas de “*model-driven*” também conhecido como o método paramétrico e “*data-driven*” conhecido também como não paramétrico.

#### 2.4.2.1 Método “*Model-Driven*”

A metodologia define a priori dois tipos de estruturas, edificações simples e edificações complexas. No caso de edificações simples, inicia-se o processo com o estudo de um conjunto de pontos pertencente a uma edificação. Em seguida, a abordagem procura o modelo mais apropriado associado a formas de edificações básicas pertencentes a uma biblioteca de modelos. Posteriormente são calculados os parâmetros mais prováveis e estes são associados aos parâmetros do modelo definido a priori. No caso de edificações complexas muitos autores sugerem segmentar a nuvem de pontos, associadas às edificações primitivas, usando dados das plantas baixas das edificações ou outro tipo de informação.

#### 2.4.2.2 Método “*Data-Driven*”

Este método modela tanto edificações simples ou edificações complexas usando a nuvem de pontos como dados iniciais. Depois de alguns procedimentos a metodologia permite gerar modelos sem pertencer a um banco de dados.

Os métodos com tratamento *Data-Driven* baseiam-se principalmente em técnicas aplicadas no processamento de imagens como é se explica em (GONZALES; WOODS, 2000). Segundo (TARSHA-KURDI *et al.*, 2007) é possível classificar o método em quatro categorias que usam: A Transformada de Hough 3D, O Algoritmo RANSAC, O Crescimento de Regiões e a Técnica de Douglas-Peucker.

#### 2.4.2.2.1 Transformada de Hough 3D

Segundo Tarsha-Kurdi *et al.* (2007) a técnica da transformada de Hough é usada no processamento digital de imagens para fazer reconhecimento de figuras geométricas primitivas. Esta técnica, geralmente é usada para detectar linhas retas como em formas poligonais dos contornos das edificações e curvas como elipses e círculos. No processamento de nuvem de pontos, uma variação do algoritmo é usada para encontrar formas geométricas, tais como planos definidos em um sistema 3D. A Transformada de Hough 3D é geralmente empregada na detecção de planos de telhados de edificações. Este procedimento fundamenta-se na procura de inflexões das curvas, obtidas no espaço de parâmetros, associadas aos pontos da nuvem pertencentes a planos. Os planos são procurados no espaço de parâmetros usando a equação normal do plano mostrado na equação 3.1.

$$\cos \theta . \cos \varphi . X + \operatorname{sen} \theta . \cos \varphi . Y + \operatorname{sen} \varphi . Z = \rho \quad (3.1)$$

Onde  $\theta$ ,  $\varphi$  e  $\rho$  são os parâmetros do plano que passa através da origem. Neste espaço de parâmetros, um ponto  $(X_1, Y_1, Z_1)$  representa uma superfície sinusoidal. Os planos obtidos na nuvem são considerados estatisticamente os melhores planos. O melhor plano não significa o plano mais provável calculado por meio da teoria de Mínimos Quadrados.

O algoritmo usa quatro parâmetros. Três representam intervalos que definem a existência dos parâmetros  $\theta$ ,  $\varphi$  e  $\rho$  da equação 3.1. O quarto parâmetro é o limiar que define a existência de inflexões a serem consideradas. O resultado do algoritmo é uma matriz que contém a nuvem de pontos representada no espaço de parâmetros. É nesta matriz que são detectadas as inflexões ou picos e por tanto os pontos associados aos pontos que pertencem aos planos segundo os parâmetros inicialmente definidos.

#### 2.4.2.2.2 Algoritmo de RANSAC

O algoritmo *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC) é usada para detectar figuras geométricas como retas e círculos. Em (TARSHA-KURDI *et al.*, 2007) apresenta-se a aplicação do algoritmo de RANSAC na área de modelagem automática de edificações usando informação LIDAR. O princípio do algoritmo de RANSAC baseia-se na procura do melhor plano formado com a nuvem de pontos. Ao mesmo tempo, que se reduz o número de iterações na procura do melhor plano, o algoritmo seleciona aleatoriamente três pontos e calcula os parâmetros do plano associados a estes. O algoritmo detecta todos os pontos da nuvem original associados aos planos calculados por meio da definição de limiares. O procedimento é repetido N vezes e em cada iteração, um novo plano é obtido e comparado com o anterior, salvando o que for melhor.

O algoritmo RANSAC inicia-se com quatro dados de entrada: coordenadas de três pontos sementes, um limiar de distância existente entre o plano definido em uma das iterações, os pontos da nuvem em estudo e o número máximo de pontos que pertençam a um plano. Este número deriva da densidade de pontos e o número máximo provável da superfície plana do telhado. Outro valor empregado é a mínima probabilidade de encontrar ao menos um bom conjunto de observações em N buscas. Usualmente este valor encontra-se entre 0.90 e 0.99.

#### 2.4.2.2.3 Crescimento de Regiões

Segundo Gonzales e Woods (2000) o crescimento de regiões é um procedimento que agrupa pixels com propriedades similares definindo sub-regiões com base em critérios predefinidos de crescimento. A abordagem básica começa com uso de um conjunto de sementes pontuais e a partir delas que as regiões crescem. O crescimento de regiões se respalda na adição de cada semente aos pixels vizinhos que tenham propriedades predefinidas similares às sementes. As propriedades predefinidas por si só produzem resultados enganosos se a informação de conectividade ou adjacência não é usada no procedimento de crescimento de regiões. No caso de não ter informação a priori, um procedimento é calcular, em todos os pixels, um conjunto de propriedades que basicamente serão usados para designar pixels a regiões durante o processo de crescimento.

Em Wang (2008) é apresentado um procedimento de detecção de planos com a técnica de crescimento de regiões. Nesse trabalho, a métrica que foi considerada para agrupar os pontos baseou-se no estudo do vetor normal de pontos. O vetor normal de um ponto é definido com base numa pequena região contendo o ponto selecionado, portanto a normal pertence à pequena superfície nesse ponto. Os pontos a serem analisados têm vetores normais com módulos aceitáveis e sentidos iguais. O procedimento consta de dois passos: Primeiro, o ponto cujo vetor normal tem um comprimento maior numa vizinhança é escolhida como semente. Assim uma região de crescimento começa com a associação de uma propriedade geométrica entre a semente e a vizinhança. Definem-se dois tipos diferentes de pontos: o ativo e o candidato. Um ponto ativo é aquele ponto que pertence ao conjunto de pontos que são considerados parte de uma região plana. Um ponto candidato é um ponto a ser avaliado para pertencer a um grupo de pontos que pertencem à região plana. Após a seleção da semente, o segundo passo consta de três condições a serem satisfeitas, com o propósito de obter somente conjunto de pontos associados a superfícies planas na área em estudo.



A primeira condição é o estudo da distância entre um ponto candidato e um ponto ativo. A segunda condição é o estudo do ângulo formado entre o plano matemático definido pelos pontos ativos e o ponto candidato. A terceira condição é o ângulo formado entre os vetores de ponto ativo e o vetor do ponto candidato.

Na (FIGURA 6) são mostradas as três condições. O quadro em cor preto contem todos os pontos que inicialmente são parte de um plano. O  $d_{\text{ponto}}$  representa a distância entre um ponto ativo e um ponto (candidato) que foi representado na cor ciano. A linha tracejada verde, entre os pontos vermelhos, representa o plano matemático vista em perfil. O  $d_{\text{plano}}$  é a distância entre um ponto candidato e o plano matemático e  $\alpha$  representa o ângulo entre os vetores normais de um ponto ativo e candidato.

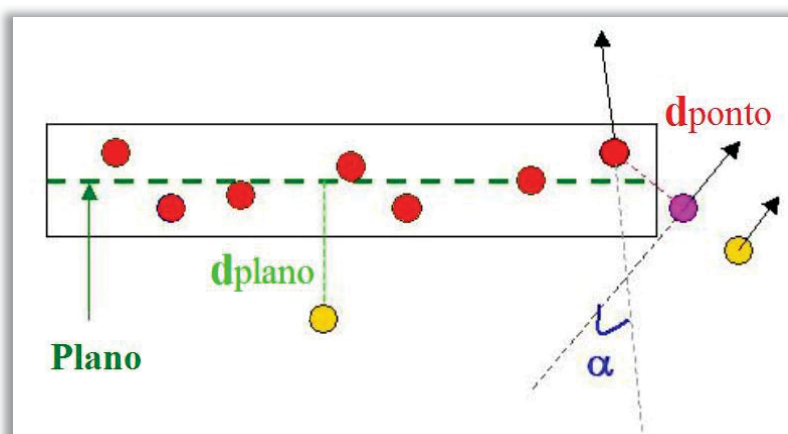


FIGURA 6 - DETECÇÃO DE PLANOS POR MEIO DE CRESCIMENTO DE REGIÕES.

FONTE: Yang (2008)

O crescimento da região se encerra quando nenhum novo ponto é aceito na avaliação para pertencer a um plano. O plano definido será aceito se o número de pontos definidores encontra-se dentro do limiar estabelecido. O resultado do procedimento depende da distribuição desses pontos.

#### 2.4.2.2.4 Técnica Douglas-Peucker

Segundo Douglas e Peucker (1973) a Técnica Douglas - Peucker visa obter uma representação mais simples e compacta de um conjunto de dados mais detalhados. A técnica é frequentemente aplicada na cartografia, SIG, computação gráfica e reconhecimento de padrões, aproximando e representando vetorialmente os limites de objetos complexos. A técnica visa dar uma solução ao problema de simplificação de pontos necessários para a representação de uma poligonal de forma mais simplificada. A representação da poligonal é realizada com menos vértices e por tanto, fica mais compacta sem perder os detalhes da representação.

Em Hu e Ye (2013) tem-se um procedimento de detecção de telhados de edificações e vegetação por meio da técnica linha de varredura ou *Scan Line* empregando o algoritmo de Douglas-Peucker. O algoritmo é usado para segmentar as linhas de varredura associadas aos objetos, presentes no levantamento LIDAR, em função da variação de altura. As linha de varredura (uma sequência de pontos) de um levantamento LIDAR são constituídas, em forma geral, por uma polilinha. Uma polilinha é conjunto de segmentos concatenados sem formar uma linha única. A segmentação visa obter uma representação geométrica dos objetos por meio de segmentos de linhas. O procedimento pode ser composto por seis etapas.

Na (FIGURA 7) são mostradas as seis etapas usadas na segmentação Scan Line. A primeira parte inicia-se com a definição da linha de varredura a ser analisada (a). A segunda parte consiste em considerar que toda a polilinha associada à linha de varredura é representada por uma linha reta, do modo que a linha reta contenha o ponto inicial e final da polilinha. Esta linha reta é chamada de borda simples (b). Na terceira parte, os pontos que não foram inclusos na borda simples são avaliados por meio do estudo de distâncias com respeito à borda simples. Se a distância é maior do que um limiar definido, os pontos são incorporados à representação aproximada da polilinha inicial, ou seja à nova borda simples (c).

Na quarta parte, como resultado de esta incorporação, a linha divide-se em segmentos unidos, aproximando-se à polilinha. O procedimento é iterativo com o estudo de distâncias com novas bordas definidas (d). A quinta mostra o resultado final da técnica como uma polilinha representativa dos pontos conectados que satisfizeram as condições antes mencionadas (e). Na sexta, é apresentada uma forma de representar os pontos pertencentes à polilinha representante, associados a diferentes superfícies, usando cores (f).

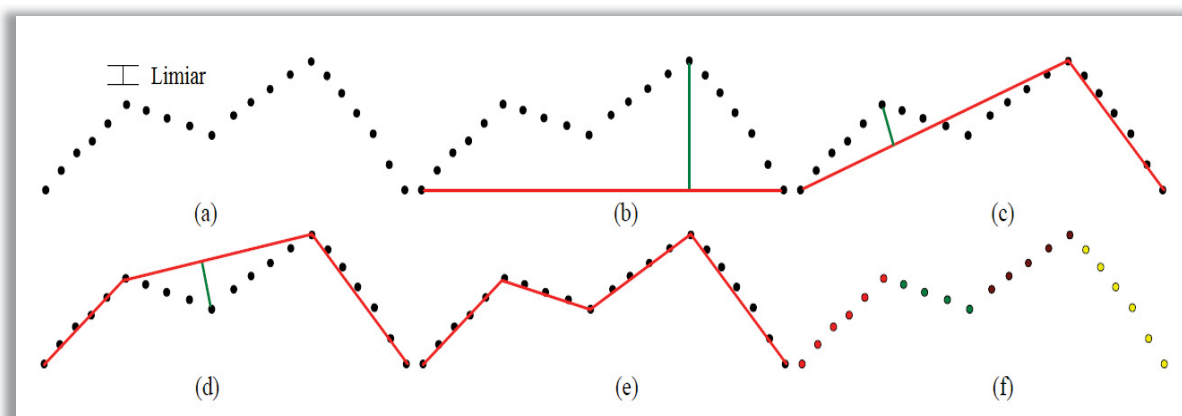


FIGURA 7 - ALGORITMO BÁSICO DOUGLAS-PEUCKER USADO NA SEGMENTAÇÃO SCAN LINE.

FONTE: Hu e Ye (2013)

Para classificar os pontos da nuvem, como o propósito da detecção de telhados, analisa-se a polilinha resultante. Considera-se que os segmentos de linha longos estão relacionados usualmente com os telhados de edificações e os curtos à vegetação. O comprimento dos segmentos é proporcional à quantidade de pontos. Usualmente a vegetação não possui mais que dois pontos. No algoritmo, a detecção dos pontos, associados às edificações, foram àqueles que são caracterizados pelas seguintes condições: maior número de pontos no limiar que forma um segmento, o grau de desigualdade e o tipo de aspereza dos pontos numa localidade. Esta aspereza é a proporção dos pontos que pertencem a um segmento longo numa vizinhança calculada por meio do vetor normal. E por ultimo a análise dos valores das alturas dos pontos.

### 2.4.3 Procedimentos Adicionais

Apresenta alguns procedimentos associados à detecção de feições de urbanas. Por pertencerem na metodologia proposta neste trabalho, apresentam-se os fundamentos teóricos.

#### 2.4.3.1 Ajustamento de dados numa Reta

Em Ghilani (2010) tem-se o ajustamento numa reta usando a equação reduzida da reta (3.2). Nesta equação,  $x$  e  $y$  são as coordenadas de um ponto,  $m$  é a declividade ou coeficiente angular da reta,  $b$  o coeficiente linear ou intercepto com  $x = 0$ .

$$y = mx + b \quad (3.2)$$

Se um conjunto de pontos estabelece realmente uma reta e são isentos de erros observacionais, todas as coordenadas deveriam ser parte de uma reta. Entretanto, isto é um caso raro e no caso mais geral, os pontos contém erros randômicos de medida. Se a reta é estabelecida como o modelo para os dados, a equação da reta resultante será obtida através de um ajustamento Mínimos Quadrados de um conjunto de equações (3.3) que descrevem as equações das observações para quatro dados pontuais  $A, B, C$  e  $D$ , mostrados na (FIGURA 8).

$$\begin{aligned} mx_A + b &= y_A + v_{yA} \\ mx_B + b &= y_B + v_{yB} \\ mx_C + b &= y_C + v_{yC} \\ mx_D + b &= y_D + v_{yD} \end{aligned} \quad (3.3)$$

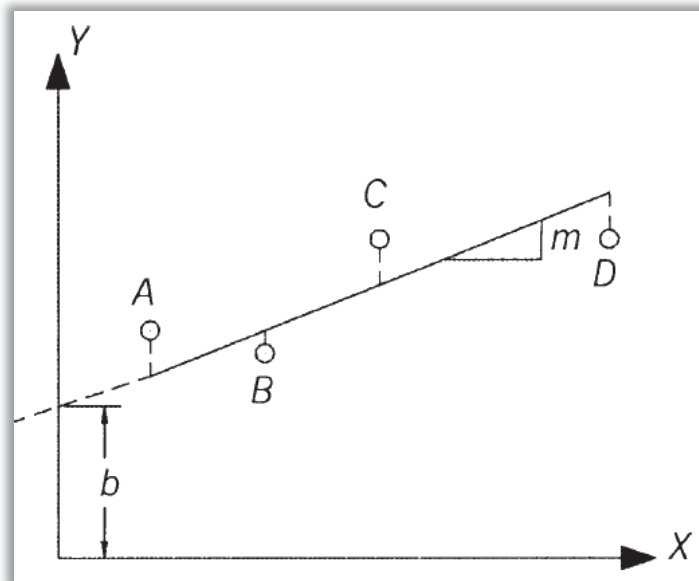


FIGURA 8 - PONTOS AJUSTADOS COMO RETA.

FONTE: Ghilani (2010)

A equação 3.4, contém duas incógnitas,  $m$  e  $b$ , com quatro observações. A representação matricial é:

$$AX = L + V \quad (3.4)$$

Onde

$$A = \begin{bmatrix} x_A & 1 \\ x_B & 1 \\ x_C & 1 \\ x_D & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} m \\ b \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} y_A \\ y_B \\ y_C \\ y_D \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_{yA} \\ v_{yB} \\ v_{yC} \\ v_{yD} \end{bmatrix}$$

A equação 3.4, é resolvida pelo método de mínimos quadrados usando a (Equação 3.5).

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L = N^{-1} A^T L \quad (3.5)$$

Quando se usa a equação reduzida da reta tal visto na equação 3.2, é importante notar que os valores de declividade não sejam próximos do valor zero.

#### 2.4.3.2 Triangulação de Delaunay

Mitishita (1997) apresenta que a modelagem digital da superfície real terrestre encontra-se fundamentada na utilização de pontos que descrevem a variação do fenômeno. A elaboração de um modelo digital se baseia, inicialmente, na formação de poliedros cujos vértices são os pontos amostrados. Os dois tipos de poliedros usados comumente são as grades regulares e as triangulações.

A grade regular é aquela que aproxima a superfície real através de um poliedro de faces retangulares. Dentre as Redes Irregulares Triangulares (RIT) conhecidas também como TIN se encontra a Triangulação de Delaunay que pode ser obtida com a condição matemática a seguir apresentada.

Seja  $P = \{p_i(X_i, Y_i), i = 1 \dots n\}$  um conjunto de pontos amostrados e  $T = \{\Delta p_i, p_j, p_k \mid \forall p_i, p_j, p_k \in P\}$  uma triangulação qualquer.  $T$  será uma triangulação de Delaunay de  $P$  se e somente se em cada triângulo  $\Delta p_i, p_j, p_k \in T$  não existirem pontos internos ao circuncírculo  $p_i, p_j, p_k$  ou ao círculo definidos pelos pontos  $p_i, p_j, p_k$ . A (FIGURA 5) mostra uma triangulação de Delaunay e a sua relação com os círculos que são formados pelos pontos amostrados (pontos em cor preta).

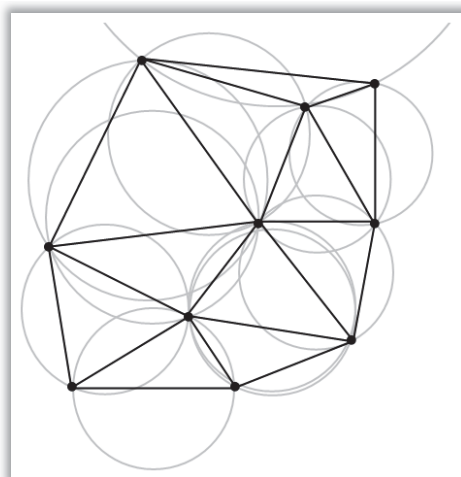


FIGURA 9 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.

FONTE: Adaptado de Borouchaki et al, (1997)

A rigorosidade da definição da triangulação de Delaunay por meio do diagrama de Voronoi e grafos pode-se encontrar em (DE BERG *et al.*, 2000) e no trabalho do matemático Boris Nikolaevich Delone traduzido ao Frances (DELAUNAY, 1934).

Usualmente quando há um grupo de pontos LIDAR em regiões planas, como no caso de pontos presentes no telhado, efetua-se uma triangulação de Delaunay com o propósito de estabelecer conectividade entre os pontos e analisar os vetores normais das faces dos triângulos resultado da triangulação. A partir das magnitudes das características dos vetores normais estabelecem-se limiares para classificar os pontos associados aos diferentes objetos presentes no telhado.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para a extração dos contornos de edificações nessa pesquisa, utilizando somente as informações tridimensionais obtidas da nuvem de pontos LIDAR, baseia-se em quatro etapas, apresentadas na (FIGURA 10) e descritas a seguir:

**1ª.Definição da área de interesse:** Identificação de área que contenha um conjunto de edificações;

**2ª.Segmentação de pontos lidar:** Separação de pontos pertencentes somente aos telhados das edificações;

**3ª.Definição de bordas:** Extração de contornos das edificações.

**4ª.Verificação de qualidade:** Análise do sucesso das extrações de bordas realizadas.

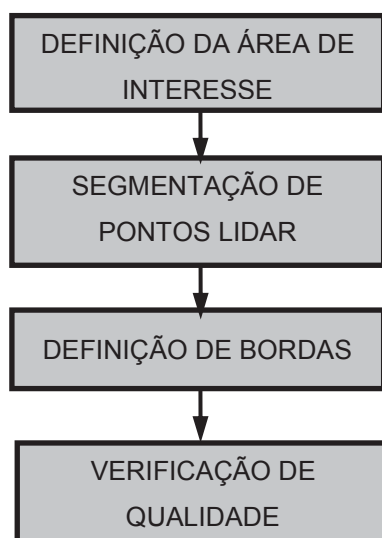


FIGURA 10 - ETAPAS GERAIS DA METODOLOGIA.  
FONTE: O Autor, (2013)



### 3.1 DEFINIÇÃO DA AREA DE INTERESSE

Para facilitar o processamento computacional nessa pesquisa, a primeira etapa, mostrada na (FIGURA 11) realizará a escolha de uma região mais ou menos plana, contendo uma concentração de edificações. A escolha da região é um processo visual (com auxílio da cognição humana) empregando a imagem hipsométrica elaborada a partir das coordenadas 3D UTM.

O critério da escolha de áreas de estudos com terreno aproximadamente plano está baseado em características do resultado esperado como consequência da etapa de segmentação. Na etapa de segmentação, por meio da eleição de um limiar de altura, pode-se separar duas regiões: uma região que contenha a maior quantidade pontos pertencentes ao telhado e uma segunda região que contenha a maior quantidade de pontos pertencentes ao terreno e partes da edificação como as paredes, chão, janelas, etc. Se a região não fosse plana na separação antes mencionadas, pontos não desejáveis se adicionariam pertencentes a paredes, janelas, terreno, etc.

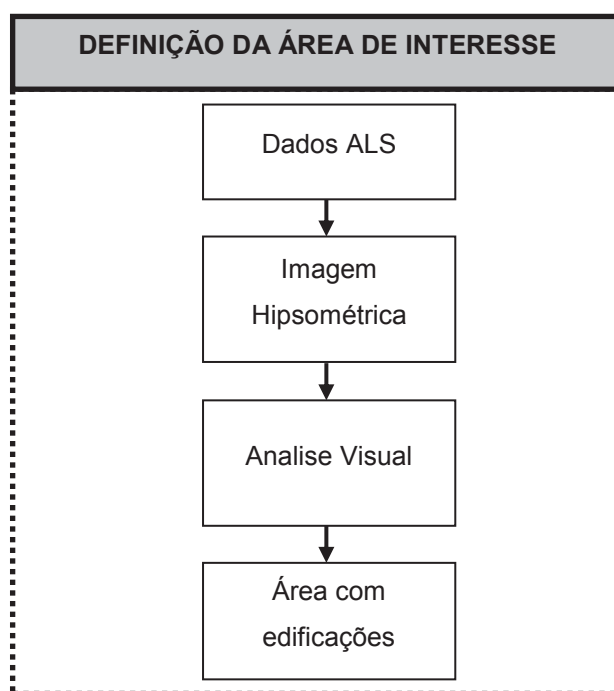


FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DA DEFINIÇÃO DA AREA DE INTERESSE.

FONTE: O Autor, (2013).

### 3.2 SEGMENTAÇÃO DE PONTOS LIDAR

Nessa etapa de trabalho serão realizados processamentos que visam à extração de pontos representativos dos contornos das águas que compõem os telhados das edificações. As etapas empregadas são apresentadas da (FIGURA 12) e são a seguir discutidas.

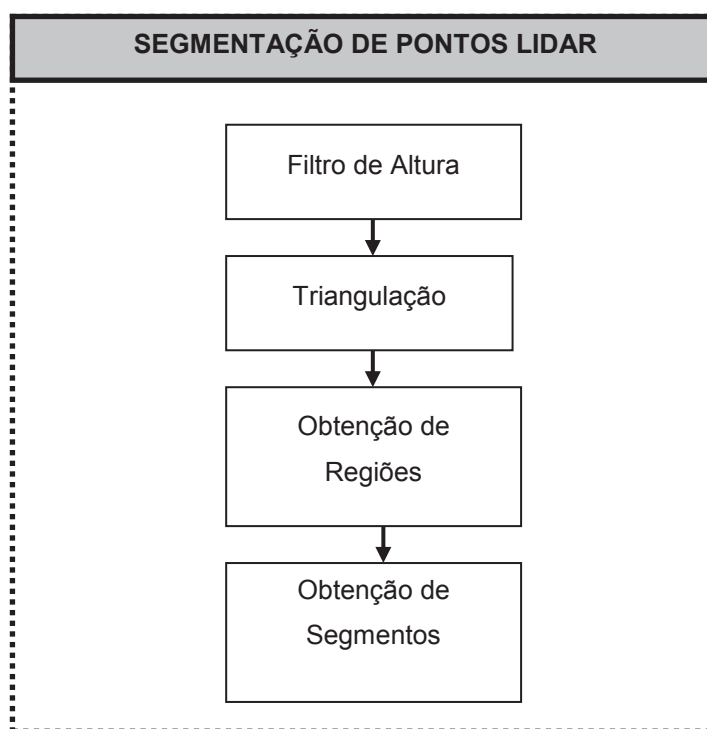


FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DE SEGMENTAÇÃO DE PONTOS LIDAR.

FONTE: O Autor, (2013).

#### 3.2.1 Filtro de Altura

Essa etapa tem por objetivo realizar uma primeira segmentação dos pontos lidar, separando pontos associados aos telhados das edificações com base num filtro de altura. O procedimento manual inicia-se com a escolha do ponto com a menor altura associado ao telhado. Neste procedimento eventualmente existe a probabilidade da presença de pontos pertencentes a vegetação e fios de corrente elétrica entre outros acima do telhado.

Como já mencionado, pretende-se trabalhar só com pontos associados aos telhados, mas devido ao escasso significado semântico dos pontos LIDAR é possível a existência de pontos pertencentes a paredes, arvores, postes, fios e outros objetos na parte baixa dos pontos pertencentes ao telhado e que erradamente sejam selecionados. Entretanto, em virtude de ser uma etapa manual a probabilidade de processar pontos não desejados é mínima.

### 3.2.2 Triangulação

Empregando-se os pontos laser selecionados na etapa 3.2.1 será realizada uma triangulação de “Delaunay”. Este procedimento fornece a conectividade entre pontos LIDAR.

### 3.2.3 Obtenção de Regiões

Esta etapa tem por objetivo a obtenção de grupos ou regiões de pontos LIDAR que representem as águas dos telhados. Os pontos a serem processados são o resultado da etapa 3.2.1 e provido de conectividade atingida na etapa 3.2.2.

Inicialmente será definida uma rotina que agrupe pontos que satisfaçam duas condições. A primeira condição está baseada na união de triângulos formados na etapa anterior. Se o ângulo formado entre dois planos consecutivos formados pelos triângulos for menor que um limiar angular, os pontos que compõem os triângulos serão parte do mesmo polígono ou figura geométrica fechada. A segunda condição está baseada na escolha do número mínimo de pontos LIDAR que compõem o polígono, resultado da primeira condição. Os limiares ou parâmetros definidos nas duas condições anteriores são modificados manualmente até que as regiões representem às águas dos telhados. A rotina continua até encontrar todas as regiões possíveis que cumpram com as duas condições.

### 3.2.4 Obtenção de Segmentos

Esta etapa tem por objetivo a obtenção de segmentos de retas que representem as bordas das regiões representativas das águas resultado da etapa 3.2.3.

Primeiramente define-se um limiar de altura desde o ponto mais baixo, nas diferentes águas, de toda a região representativa da água do telhado em estudo. Os pontos menores do que o limiar anteriormente definido gera um subconjunto de pontos representativos do contorno da água em estudo. A distribuição dos pontos de este subconjunto fornece a direção aproximada do contorno da água. Com o propósito de obter um segmento de reta, ajusta-se uma reta usando o subconjunto anteriormente definido. Por tanto, a partir de características tridimensionais obtém-se feições bidimensionais.

Devido à magnitude das coordenadas tridimensionais UTM planimétricas, da ordem aproximada de  $10^5$ , o ajustamento a ser realizado poderá apresentar resultados inconsistentes na determinação dos parâmetros envolvidos. Assim. Optou-se por empregar uma origem local que foi definida para o centro das coordenadas tridimensionais UTM da região trabalhada.

O resultado do ajustamento paramétrico são os parâmetros que definem a reta ajustada. Ao final obtém-se o segmento de reta buscado por meio dos parâmetros da reta ajustada e os pontos extremos do subconjunto na direção da reta. Conjuntamente armazena-se a quantidade de pontos com os quais as retas foram ajustadas. Na etapa 3.2.1 foi mencionada a pequena possibilidade de ter a seleção de pontos não desejados, mesmo sendo empregada a cognição humana. Nesta etapa, o procedimento do ajustamento contribuirá para a redução de pontos indesejados.

Na FIGURA 13 mostra-se a etapa de obtenção de segmentos numa análise de uma face do telhado. As linhas vermelhas tracejadas representam a delimitação das águas. Os círculos representam os pontos LIDAR. As circunferências em cor cinza e pretas representam os pontos LIDAR que serão usados no processamento. Esses pontos são separados de outros pontos LIDAR empregando um limiar de altura. A reta  $Li$  representa a reta resultado do ajustamento dos pontos em cor cinza e preto.  $Le$  é o resultado da translação de  $Li$  que passa por o ponto de altura mínima. As circunferências pretas representam pontos LIDAR existentes nos extremos na direção da reta  $Li$ .  $Le$  é o resultado da translação de  $Li$  que passa por o ponto de altura mínima. As circunferências pretas representam pontos LIDAR existentes nos extremos na direção da reta  $Li$ . O segmento verde  $\overline{AB}$  é um subconjunto da reta  $Le$ . Os pontos A e B são resultado da projeção dos pontos em cor preto sobre a reta  $Le$ . Logo o segmento  $\overline{AB}$  é o contorno representativo da água. Nesta pesquisa, denotara-se os segmentos calculados com a letra S, portanto S2E1 significa segmento 2 da edificação E1.

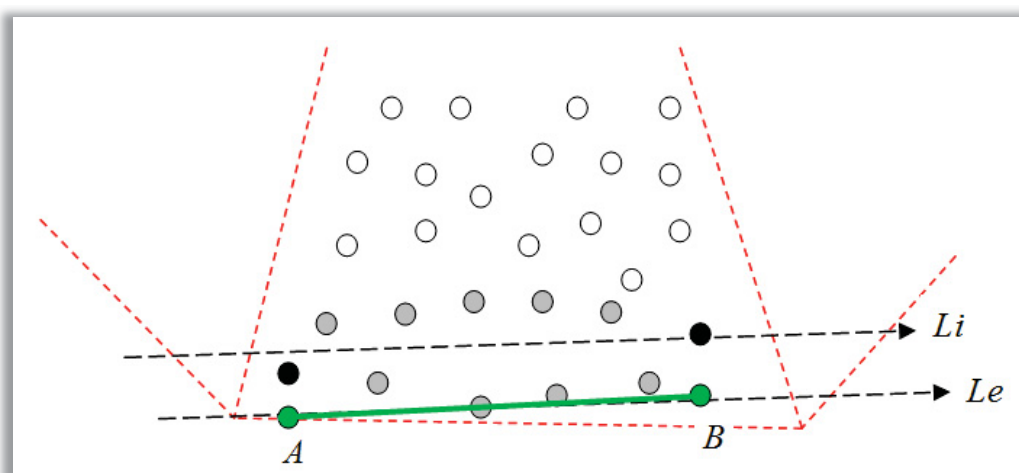


FIGURA 13 - DEFINIÇÃO DA BORDA DA ÁGUA.

FONTE: O Autor, (2013).

### 3.3 DEFINIÇÃO DO CONTORNO

Esta etapa tem por objetivo a construção do contorno do telhado. A partir dos segmentos obtidos na etapa 3.2.4 adiciona-se um mecanismo de conectividade para construir o contorno. Nesta pesquisa propõem-se dois tipos de contornos a calcular.

O primeiro contorno é composto por lados não ortogonais chamado de contorno inicial. O procedimento inicia-se com uma rotina que tem por objetivo encontrar a conectividade entre os segmentos para formar uma figura geométrica fechada. A rotina atinge a conectividade por meio do estudo das distâncias que existem entre os extremos dos segmentos. O análise das distâncias realiza-se entre o extremo de um segmento em comparação com todos os outros extremos existentes, aceitando resultados redundantes.

Na Figura 14 apresenta-se o estudo de conectividade entre os segmentos. Consideram-se dois segmentos próximos, o segmento 1 e o segmento 2. Sejam 1a e 1b os extremos do primeiro segmento 1 e 2a e 2b os extremos do segundo segmento 2, se a primeira ligação obtida foi 1b-2b significa que o extremo a ser analisado foi 1b com respeito aos outros todos e a menor distância encontra foi com o extremo 2b. A segunda observação esperada seria 2b-1b. Isto significa que analisado o extremo 2b, com respeito aos outros, a menor distância encontrada foi com o extremo 1b. Estas duas observações representam a mesma conectividade entre os extremos. Além disso, eliminando a características (letras) dos extremos, neste caso *b*, representa a conectividade do segmento 2 com o segmento1, ou seja a conectividade 2-1. Por tanto uma vantagem dessa metodologia é a abundância de observações que permitem solucionar erros na comparação de distâncias entre todos os extremos dos segmentos. Tendo a conectividade estabelecida entre os segmentos, procede-se com a prolongação dos segmentos para poder estabelecer a intersecção das retas. Os pontos resultado da intersecção define os vértices do contorno do telhado. Com os vértices resultado da intersecção é possível definir a borda inicial.

A (FIGURA 14) ilustra o caso para um telhado de quatro águas. Os pontos 1a e 1b representam os extremos do segmento 1. Por tanto a conectividade do segmento 1 com o segmento 4 e o segmento 2 acontecerá nas distancias mínimas encontradas entre 4a e 1a ,bem como 1b e 2b. O racoamento similar é utilizado nos outros segmentos 2, 3 e 4 para a formação do contorno inicial.

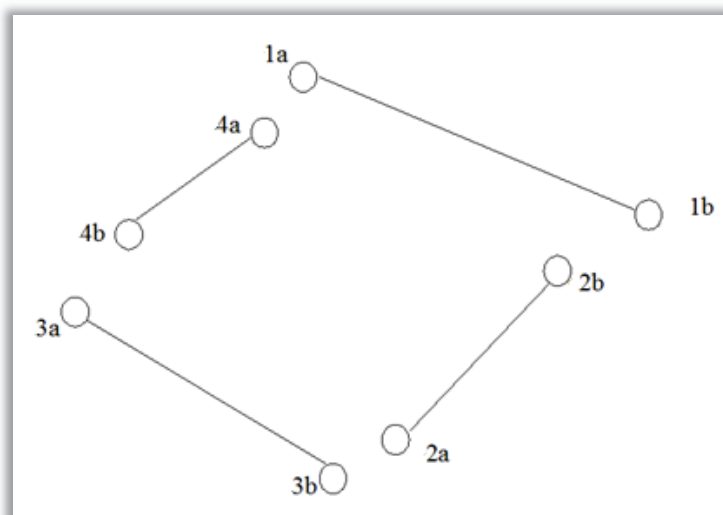


FIGURA 14 - CONECTIVIDADE DOS SEGMENTOS.

FONTE: O Autor, (2013).

Verificaram-se nesta pesquisa dois tipos de erros no procedimento de conectividade que foram solucionados devido à abundância de observações das distâncias mínimas. Para exemplificar estes casos suponhamos que no QUADRO 1 tem-se o resultado do estudo de conectividade entre os segmentos do telhado do exemplo representado na FIGURA 14. As letras a e b representam extremos opostos de um segmento. Os resultados esperados segundo a FIGURA 14 seriam: 1b-2b, 2b-1b, 1a-4a, 4a-1a, 3a-4b, 4b-3a, 3b-2a e 2a-3b mas os resultados nem sempre são assim. A diferença encontra-se nas três ultimas linhas. Embora a conexão 4b-1b exiba um erro, na antepenúltima linha, este é corrigido pela conexão 3a-4b que representa a conexão 3-4.

Extremo origem	Extremo comparado
1b	2a
2a	1b
1a	4a
4a	1a
3a	4b
4b	1b
3b	4b
2b	1b

QUADRO 1 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS.

FONTE: O Autor, (2013)

O segundo erro acontece nas duas ultimas linhas, isto é a perda absoluta da conexão 2-3 no estudo de comparação entre as distâncias dos extremos dos segmentos. Este erro foi resolvido por uma "condição de fechamento" a qual considera a existência de todas as outras conexões. Esta condição analisa as conexões entre todos os extremos obtidos. As conexões entre os segmentos obtidos neste estudo são 1-2, 1-4 e 3-4.

Repara-se que os segmentos 1 e 4 aparecem duas vezes conectados. A condição de fechamento analisa o fato que os segmentos 2 e 3 somente apareceram uma vez. Por tanto a conexão a ser adicionada será 2-3. Então o resultado final terá as conexões 1-2, 1-4, 3-4 e 2-3 estabelecendo assim a conectividade entre todos os segmentos.

O segundo tipo de contorno elaborado é chamado de contorno ortogonal obtém-se usando os dados obtidos no contorno inicial e adicionando uma condição de ortogonalidade entre os lados. Esta condição estabelece a escolha de um único parâmetro de entre os parâmetros de declividade associado aos diferentes segmentos calculados. Por meio da escolha deste único valor de declividade e da inversa negativa construí-se o contorno ortogonal.



A busca da declividade, dentro do grupo de declividades, pertencentes aos diferentes segmentos, visa usar a declividade do segmento mais próximo ao real. As características de um segmento serão o comprimento do segmento e a quantidade de pontos usados no ajustamento, armazenados da etapa 3.2.4. Os motivos das escolhas do número de pontos e do comprimento estão baseados nas características de abundância de observações e na associação que se tem na modelagem de uma feição linear. Se as regiões de pontos, obtidas na etapa 3.2.3, fossem homogêneas em quanto a sua distribuição, não se precisaria da característica do número de pontos. Porém devido que as regiões representativas são desuniformes ou heterogêneas, precisa-se das duas características.

Para poder examinar estas duas características num único valor numérico define-se um fator chamado de índice de predominância. O índice de predominância é resultado da multiplicação do comprimento do segmento pelo número de pontos usado no ajustamento. O índice é o resultado de uma fórmula empírica proposta nesta pesquisa. Em quanto ao valor do coeficiente linear ou independente da equação reduzida da reta, este não muda em todo o processo de ortogonalização nos diferentes segmentos. Desta forma obtém-se o contorno ortogonal ou retificado.

A FIGURA 15 mostra a diferença entre os dois tipos de contornos produzidos para o caso de um telhado de quatro águas, o inicial e o ortogonal. A partir dos segmentos obtidos na borda primitiva escolhe-se o segmento mais próximo ao real, por meio do índice de predominância, exemplificado com o lado de cor verde. A partir de este lado obtém-se o segmento perpendicular ao verde, representado por a cor amarelo, com o propósito de construir o contorno ortogonal.

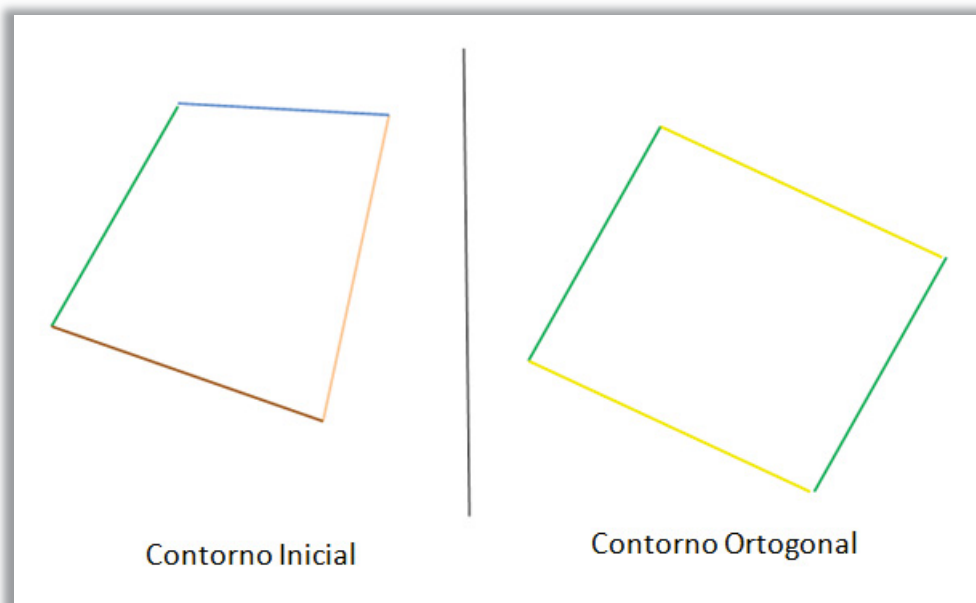


FIGURA 15 - TIPOS DE CONTORNOS.

FONTE: O Autor, (2013).

O escopo final dos dois tipos de contornos obtidos é obter as coordenadas dos vértices dos polígonos formados e o cálculo das áreas definidas pelos contornos. Nesta pesquisa, denotam-se os lados calculados com a letra Li e Lo os contornos inicial e ortogonal respectivamente, portanto Li3E4 significa lado 3 do contorno inicial pertencente a edificação E4. Os lados Li1 ou Lo1 representará ao lado formado na localização aproximada do segmento S1. Além disso, designa-se com a letra "a" ao ponto estabelecido manualmente para delimitar uma área de estudo. Exemplificando, a2A1 significara ponto a2 da área A1.

### 3.4 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE

Nesta etapa apresenta-se o procedimento empregado para verificar o desempenho do método proposto para a extração semiautomática dos contornos dos telhados das edificações discutido da etapa 3.3.

No método semiautomático se obtém os vértices dos polígonos que definem os dois tipos de contornos e o valor numérico da área que foi delimitada pelo polígono. No método manual, com base na digitalização manual, obtêm-se os valores dos vértices dos contornos com auxílio da imagem de hipsométrica, chamados de Pontos de Avaliação de Qualidade (PAQ). Tendo-se os PAQ, pode-se construir o polígono que representa o contorno do telhado, considerado isento de erros. Através dos PAQ pode-se calcular a área associada ao contorno obtida de forma manual. Este contorno obtido de forma manual será chamado de contorno manual.

O primeiro método de avaliação é feito conforme visto em (GALVANIN, 2007). A avaliação do desempenho do método semiautomático usando o indicador de qualidade chamado de Completeza de Área (CA). Este indicador se baseia na comparação porcentual entre as áreas obtidas na extração semiautomática e a extração manual. O cálculo do indicador é realizado de acordo com a equação 4.1 que determina o grau de exatidão da extração semiautomática do contorno de uma edificação. Sendo (A) igual a área extraída de forma manual e (B) a área extraída de forma automático ou semiautomático (B).

$$CA = \left\{ 1 - \left( \frac{|A - B|}{A} \right) \right\} \times 100 \quad (4.1)$$

Os resultados do cálculo do índice CA são obtidos em valores reais, mas com o propósito de simplificar, estes valores são arredondados para valores inteiros.

O segundo procedimento para avaliação de qualidade foi realizado por meio da medição da discrepância existente entre as coordenadas dos vértices dos dois tipos de contornos calculado de forma semiautomática e as coordenadas dos PAQ reconhecidas de forma manual na imagem hipsométrica.

Os procedimentos semiautomáticos empregados para a definição do contorno de uma edificação trabalham com a nuvem de pontos num referencial local. No caso do método manual, a identificação dos vértices dos contornos é realizada com a imagem hipsométrica no referencial UTM. Nas comparações entre as coordenadas dos vértices, para compatibilizar os referenciais envolvidos, primeiramente é realizada uma transformação de coordenadas de locais para UTM.

Denotam-se os vértices dos contornos calculados com a letra  $V_i$  e  $V_o$ , sendo os contornos inicial e ortogonal respectivamente. Portanto  $V_{i3E1}$  significa vértice 3 do contorno inicial pertencente a edificação E1.  $V_{o4E2}$  indica o vértice 4 obtido manualmente na imagem hipsométrica, na edificação 2.

## 4 MATERIAIS UTILIZADOS

### 4.1 RECURSOS DE EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS

O Laboratório de Fotogrametria, do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal da Paraná, disponibilizou um computador Core 2 Duo, com processador T5550, memória RAM de 4 GB e disco rígido de 160 GB para a execução da pesquisa proposta. O sistema operacional utilizado é Windows Vista® e a plataforma computacional onde serão desenvolvidos os algoritmos é MATLAB, 7.10.

### 4.2 ÁREAS DE ESTUDOS

As áreas utilizadas como elemento de pesquisa foram selecionadas a partir de um levantamento LIDAR realizado pela empresa ENGEFOTO Engenharia e Aerolevantamentos S.A. Esse levantamento compreende parte de três bairros: Graças, Torre e Madalena na cidade de Recife (Pernambuco). A FIGURA 16 mostra a imagem hipsométrica no referencial UTM (E, N) e altitude ortométrica H. A partir dessa imagem, foram selecionadas quatro áreas de estudo: A1, A2, A3 e A4.

Na área A1 tem-se a edificação E1 de quatro águas, isolada de outras edificações e outros objetos. A FIGURA 17 é a imagem hipsométrica com a área A1, definida manualmente. O QUADRO 2 mostra as coordenadas dos vértices que definem a área A1 na imagem hipsométrica.

A área A2 possui a edificação E2 conjugada de seis águas com pouca presença de vegetação. A FIGURA 18 é a imagem hipsométrica da área A2, definida manualmente. O QUADRO 3 mostra as coordenadas dos vértices que definem a área A2 na imagem hipsométrica.

A área A3 mostra a edificação E3 contendo oito águas. Na FIGURA 19 tem-se a imagem hipsométrica da região A3, definida manualmente. O QUADRO 4 mostra as coordenadas dos vértices que definem a área A3 na imagem hipsométrica.

A área A4 apresenta a edificação E4 contendo 10 águas e com pequena presença de vegetação. A FIGURA 20 mostra a imagem hipsométrica da área 4, definida manualmente. O QUADRO 5 mostra as coordenadas dos vértices que definem a área A4 na imagem hipsométrica.



FIGURA 16 - IMAGEM HIPSOMETRICA.

FONTE: O Autor, (2013).

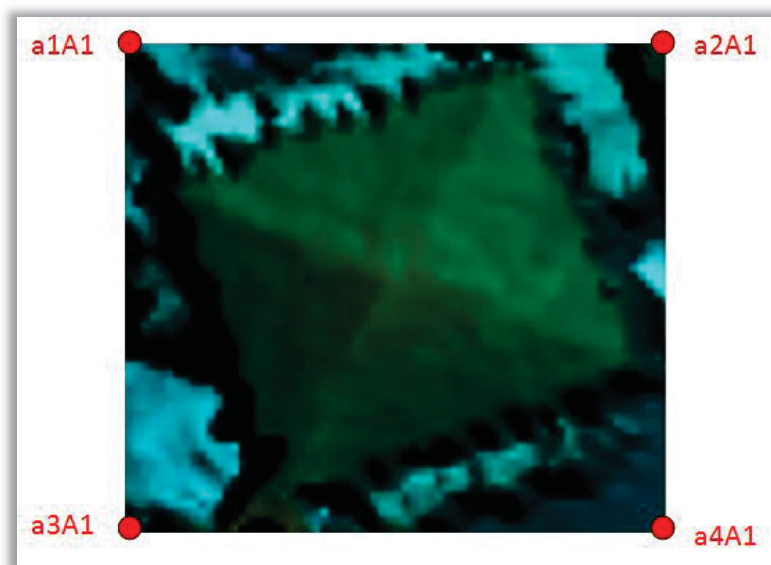


FIGURA 17 - ÁREA A1.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértices	Coordenada Linha (m)	Coordenada Coluna (m)
A1	a1A1	9110494,20	290772,35
	a2A1	9110497,90	290782,05
	a3A1	9110488,90	290786,25
	a4A1	9110485,20	290775,45

QUADRO 2 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A1.

FONTE: O Autor, (2013)

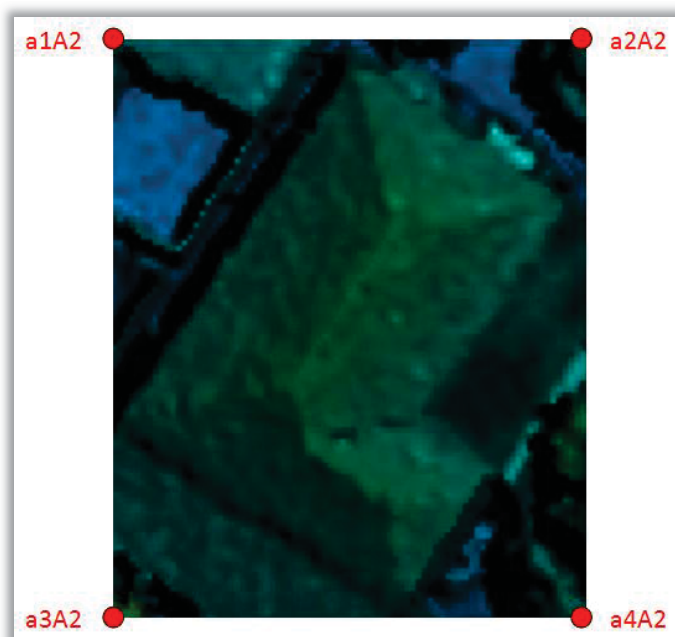


FIGURA 18 - ÁREA A2.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértices	Coordenada Linha (m)	Coordenada Coluna (m)
A2	a1A2	9109779,90	290545,10
	a2A2	9109777,55	290563,30
	a3A2	9109757,25	290564,85
	a4A2	9109759,25	290544,30

QUADRO 3 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A2.

FONTE: O Autor, (2013)



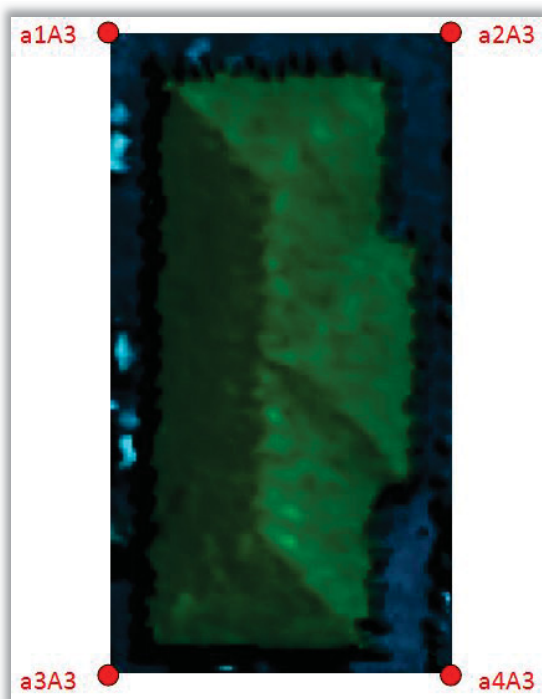


FIGURA 19 - ÁREA A3.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértices	Coordenada Linha (m)	Coordenada Coluna (m)
A3	a1A3	9109628,90	290505,65
	a2A3	9109628,00	290522,25
	a3A3	9109598,40	290505,05
	a4A3	9109598,00	290520,95

QUADRO 4 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A3.

FONTE: O Autor, (2013)

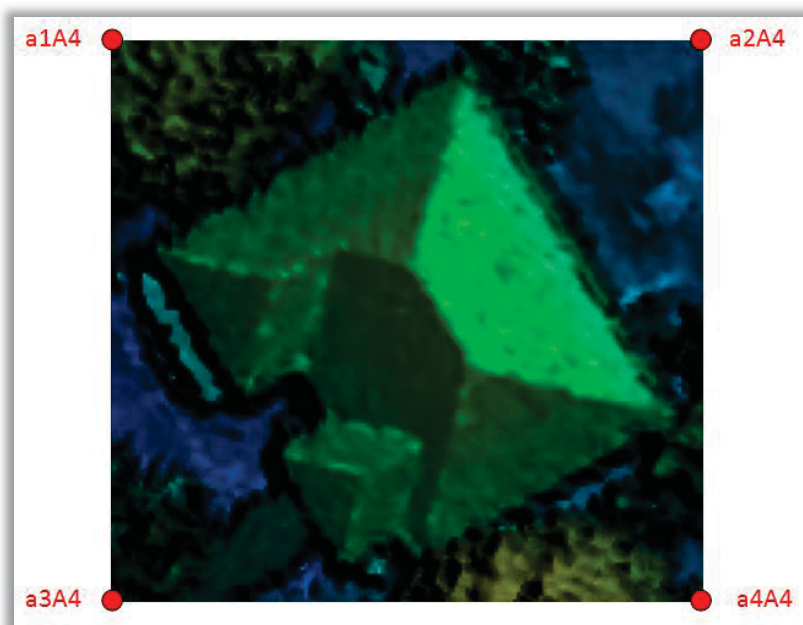


FIGURA 20 - ÁREA A4.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértices	Coordenada Linha (m)	Coordenada Coluna (m)
A4	a1A4	9109628,90	290505,65
	a2A4	9109628,00	290522,25
	a3A4	9109598,40	290505,05
	a4A4	9109598,00	290520,95

QUADRO 5 - COORDENADAS DE DELIMITAÇÃO DA ÁREA A4.

FONTE: O Autor, (2013)

O levantamento LIDAR foi realizado com o uso de o sistema LIDAR OPTECH ALTM Gemini da empresa ENGEFOTO Engenharia e Aerolevantamentos S.A., apresentado na (FIGURA 21). A densidade de pontos LIDAR da área de pesquisa é de 5,5 pontos/m<sup>2</sup>. Em algumas áreas, houve sobreposição de faixas, o que nesse caso, dobra a densidade de pontos. O QUADRO 6 descreve suas principais características do sistema laser scanner OPTECH ALTM.



FIGURA 21 - SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM Gemini.

FONTE: OPTECH, (2014)

CARACTERISTICA	MAGNITUDE
Frequência de Repetição dos Pulsos	33-167 kHz
Frequência de Perfilamento	Até 70 Hz
Angulo de abertura	De 0° a $\pm 50^\circ$
Altura Máxima	4000 m.
Dados Gravados	1º Pulso, 2º Pulso, 3º Pulso, ultimo retorno, Intensidade

QUADRO 6 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM Gemini.

FONTE: OPTECH, (2014)

## 5 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 PONTOS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE - PAQ

Com o propósito de avaliar a qualidade do processo da extração dos contornos das edificações foi realizada a extração manual dos vértices das edificações de estudo, definidos nas diferentes áreas de estudo, denominados PAQ. As coordenadas dos pontos PAQ foram obtidas por meio da digitalização manual da imagem georeferenciada hipsométrica, resultado do levantamento LIDAR. As FIGURAS 22, 23, 24 e 25 mostram a posição dos pontos PAQ nas áreas A1, A2, A3 e A4 respectivamente. Os QUADROS 7, 8, 9 e 10 mostram as coordenadas UTM dos pontos PAQ nas áreas A1, A2, A3 e A4 respectivamente.

As áreas calculadas com o uso dos pontos PAQ representaram o valor (A) na Equação (3). Ao serem confrontadas com o valor (B) resultado do cálculo semiautomático e por meio da equação 4.1 obtém-se o indicador CA.

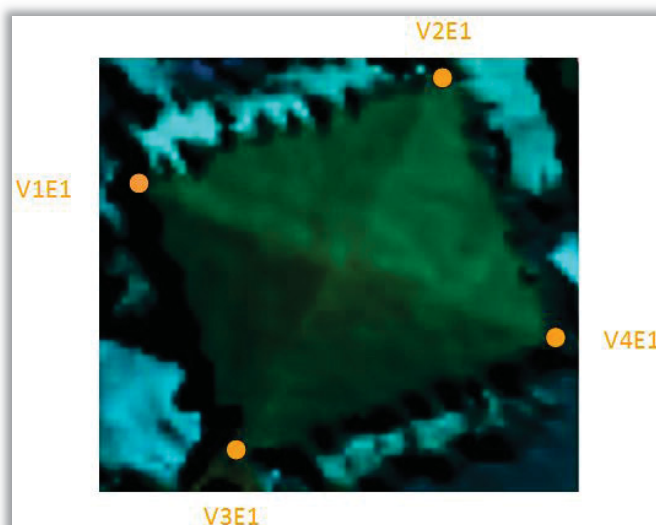


FIGURA 22 - PAQ A1 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013).

Área	Vértices	Coordenada N (m)	Coordenada E (m)
Edificação 1	V1E1	9110493,62	290773,37
	V2E1	9110496,70	290781,77
	V3E1	9110489,30	290784,85
	V4E1	9110486,18	290776,17

QUADRO 7 - COORDENADAS PAQ A1 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

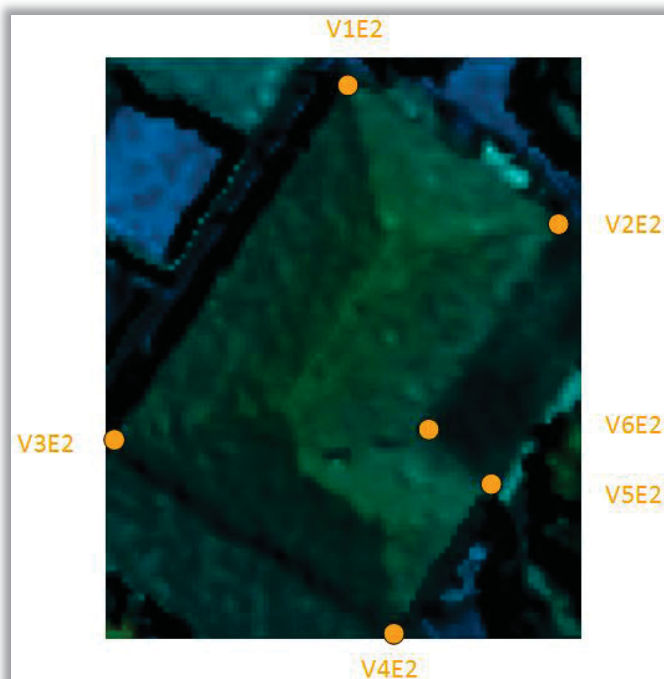


FIGURA 23 - PAQ A2 NA IMAGEM HIPSONOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértices	Coordenada N (m)	Coordenada E (m)
Edificação 2	V1E2	9109777,83	290554,85
	V2E2	9109772,90	290562,05
	V3E2	9109765,37	290546,65
	V4E2	9109759,10	290556,32
	V5E2	9109764,17	290559,45
	V6E2	9109765,77	290557,38

QUADRO 8- COORDENADAS PAQ A2 NA IMAGEM HIPSONOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

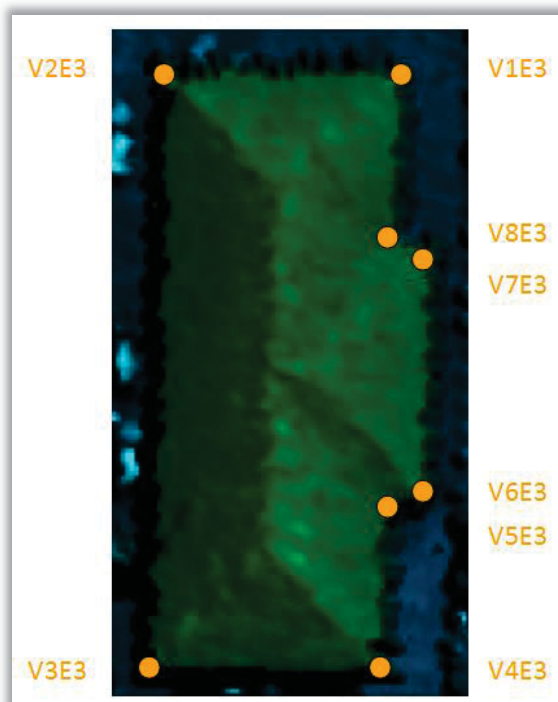


FIGURA 24 - PAQ A3 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértice	Coordenada N (m)	Coordenada E (m)
Edificação 3	V1E3	9109626,40	290518,75
	V2E3	9109626,50	290508,45
	V3E3	9109600,40	290507,85
	V4E3	9109600,20	290518,15
	V5E3	9109607,40	290518,05
	V6E3	9109608,10	290519,95
	V7E3	9109618,60	290520,60
	V8E3	9109618,80	290518,85

QUADRO 9 - COORDENADAS PAQ A3 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

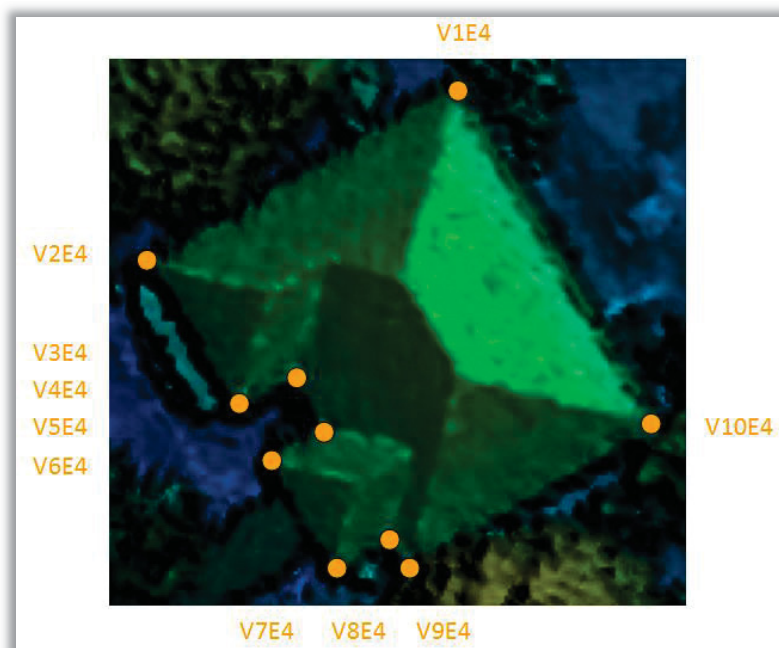


FIGURA 25 - PAQ A4 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)

Área	Vértice	Coordenada N (m)	Coordenada E (m)
Edificação 4	V1E4	9110424,30	290311,38
	V2E4	9110414,70	290294,18
	V3E4	9110408,10	290302,32
	V4E4	9110406,57	290299,38
	V5E4	9110405,37	290303,78
	V6E4	9110403,57	290301,25
	V7E4	9110397,43	290304,78
	V8E4	9110399,03	290307,58
	V9E4	9110397,83	290308,98
	V10E4	9110405,43	290322,12

QUADRO 10 - COORDENADAS PAQ A4 NA IMAGEM HIPSOMÉTRICA.

FONTE: O Autor, (2013)



## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

### 5.2.1 Experimento 01 - Edificação 1

A área A1 pertence ao Bairro Graças e contém a Edificação 1 de quatro águas como é apresentada na FIGURA 17. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento dos processos de extração de bordas associado ao telhado definido por quatro águas e avaliar a qualidade dessa extração por meio do indicador CA. Por meio de uma análise visual na nuvem associada à área A1, empregou-se o valor de 5,5 metros como limiar de altura para processar a maior quantidade de pontos associados ao telhado.

#### 5.2.1.1 Obtenção de Regiões - Edificação 1

Após a segmentação procedeu-se com a triangulação de Delaunay. Os resultados da etapa posterior, explicados na etapa 3.2.3, são apresentados na FIGURA 26. Nesta figura verifica-se que foi possível obter quatro regiões representativas das águas do telhado.

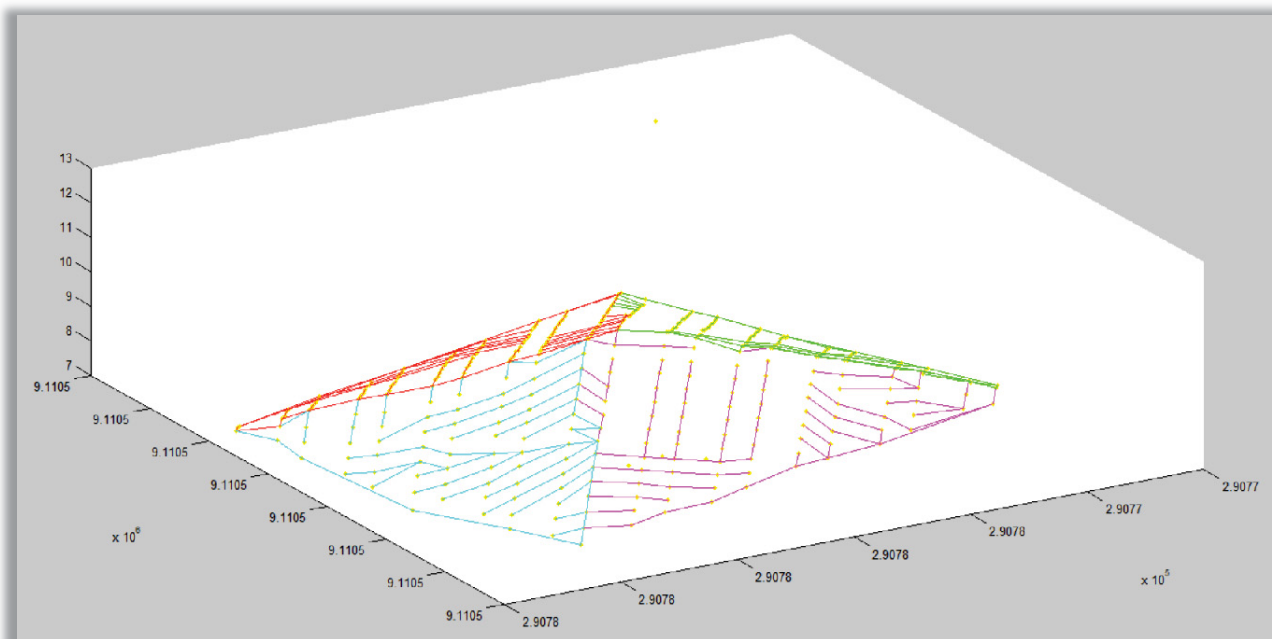


FIGURA 26 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

#### 5.2.1.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 1

Depois da obtenção das regiões procedeu-se com o procedimento descrito em 3.2.4. O QUADRO 11 apresenta as coordenadas do centro geométrico  $P1_{CM}$  da nuvem associada ao telhado que definiu a origem do sistema local no ajustamento.

	Coordenadas em E	Coordenadas em N	Coordenadas em H
$P1_{CM}$	290778,7197 m.	9110491,1512 m.	8,2544 m.

QUADRO 11 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM:

EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

Como é mostrado na FIGURA 27 o procedimento de ajustamento foi efetuado para cada água do telhado. O resultado do ajustamento foram segmentos de reta representativos dos contornos das diferentes águas: S1E1, S2E1, S3E1 e S4E1. As retas de cor azul são o resultado da translação da reta ajustada até o ponto de mais baixa altura.

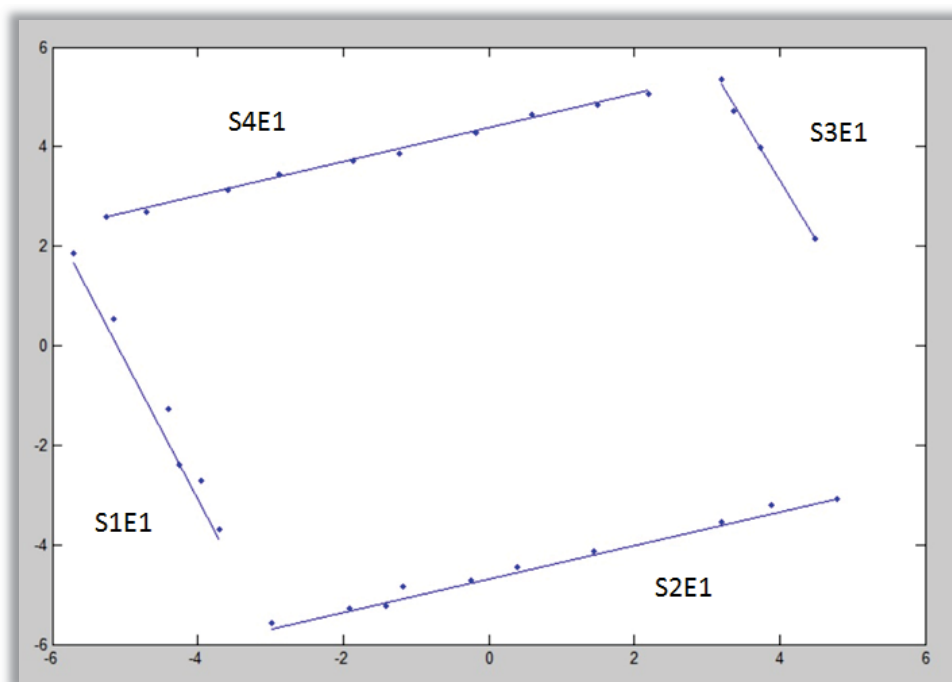


FIGURA 27 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

#### 5.2.1.3 Obtenção do Contorno - Edificação 1

Por meio da comparação das distâncias entre os extremos de cada segmento obteve-se a conectividade entre as águas do telhado. No QUADRO 12, além dos resultados redundantes esperados, constata-se que houve o erro da conexão 3b-4b. Entretanto, o equívoco foi solucionado pela conexão 2b-3b.

Extremo origem	Extremo comparado	Distância (m)
1a	4a	1,033
1b	2a	1,908
2a	1b	1,908
2b	3b	5,247
3a	4b	1,011
3b	4b	3,752
4a	1a	1,033
4b	3a	1,011

QUADRO 12 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

O próximo procedimento foi o cálculo do índice de predominância, com o propósito da obtenção do contorno ortogonal. Os cálculos, conforme apresentado no item 3.3 da metodologia, gerou os valores de índices que são apresentados no QUADRO 13. Neste caso, verifica-se que o segmento S4E1 é o mais qualificado, pois possui o maior valor, podendo ser considerado como sendo o mais próximo ao real.

Segmento	Distância do Segmento	Número de Pontos	Índice de Predominância	Índice de Predominância Normalizado
S1E1	5,929	15	88,932	0,493
S4E1	8,205	22	180,506	1,000
S3E1	3,354	4	13,419	0,074
S2E1	7,865	19	149,432	0,828

QUADRO 13 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

O QUADRO 14 apresenta a mudança dos parâmetros dos segmentos e a sua conectividade. Nesse QUADRO mostra-se a construção do contorno ortogonal baseado na declividade 0,334 e a inversa negativa dessa.

Parâmetros da reta	Segmento	Declividade da reta	Coeficiente Linear da reta	Segmento	Declividade da reta
Antes da ortogonalização	S1E1	-2,795	-13,968	S2E1	0,334
	S1E1	-2,795	-13,968	S4E1	0,340
	S4E1	0,334	-4,604	S3E1	-2,414
	S3E1	-2,414	12,964	S4E1	0,340
Depois da ortogonalização	S1E1	-2,993	-13,968	S2E1	0,334
	S1E1	-2,993	-13,968	S4E1	0,334
	S4E1	0,334	-4,604	S3E1	-2,993
	S3E1	-2,993	12,964	S4E1	0,334

QUADRO 14 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO:

EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

A (FIGURA 28) mostra três diferentes contornos. O contorno inicial em cor azul, o contorno ortogonal em cor vermelha, comparados com o contorno extraído de forma manual da imagem hipsométrica em cor verde. Verifica-se, nesta figura, que o contorno ortogonal ficou afastada do contorno definido na imagem hipsométrica. Isto devido ao erro na formação do lado Lo3E1 que deslocou o vértice V4oE1. No caso do contorno inicial, as falhas são devidas aos deslocamentos dos lados Li1E1 e Li2E1.

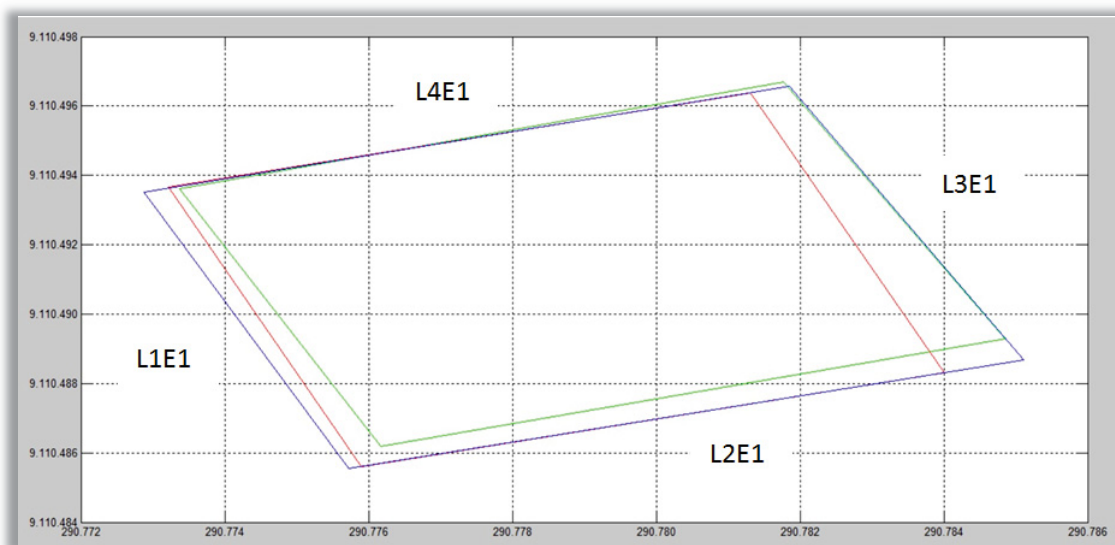


FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

As áreas calculadas delimitadas pelos contornos extraídos são apresentadas no QUADRO 15. Devido ao erro na formação do contorno ortogonal, o segmento Lo3E1 acarretou a redução na sua área. Da mesma forma no caso do contorno inicial, devido aos deslocamentos dos lados Li1E1 e Li2E1 que se afastaram mais do que no caso do contorno manual.

Borda do Telhado	Valor Numérico da Área (m <sup>2</sup> )
Inicial	82,175
Ortogonal	72,467
Imagem Hipsométrica	72,481

QUADRO 15 - ÁREA DEFINIDA PELOS CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

No QUADRO 16 apresentam-se os valores calculados do indicador CA, reparando-se que a maior área encontrada foi no contorno inicial pelos deslocamentos de um par de lados antes mencionados.

Fonte Manual (A)	Fonte Autônoma (B)	CA
Hipsométrica	inicial	87%
Hipsométrica	ortogonal	100%

QUADRO 16 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013).

A seguir, nas FIGURAS 29 e 30 apresentam-se os resultados de discrepâncias das coordenadas E e N respectivamente, existentes entre os vértices dos contornos inicial e ortogonal comparado com os vértices dos contornos extraídos manualmente na imagem hipsométrica.

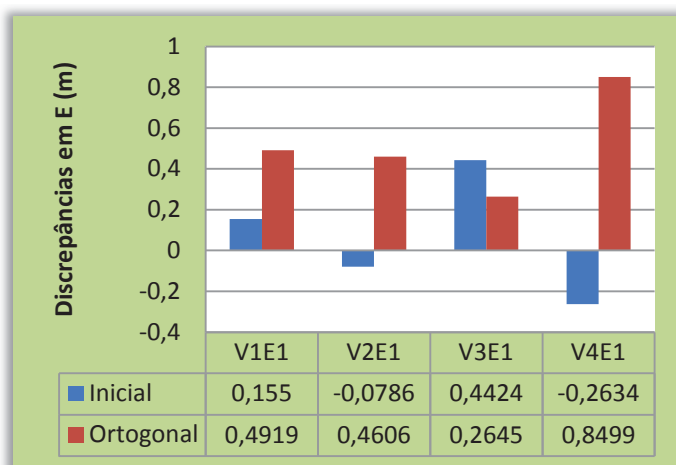


FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

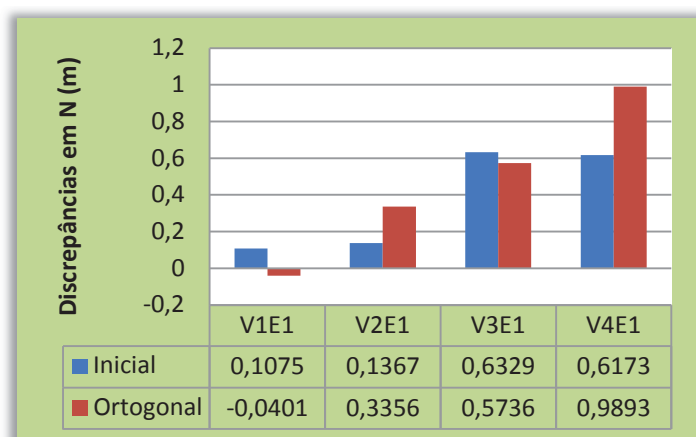


FIGURA 30 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 1.

FONTE: O Autor, (2013)

O maior deslocamento encontrado foi no vértice V4oE1, pertencente ao contorno ortogonal, foi próximo a um metro. Este resultado concorda com a análise da FIGURA 28. Embora os deslocamentos no contorno individual nos vértices V4iE1, V2iE1 e V3iE1 sejam menores do que o caso anterior, o efeito em grupo gera um deslocamento grande, produzindo uma área estendida.

### 5.2.2 Experimento 02 - Edificação 2

A área A2, pertence ao Bairro Graça, contém a Edificação 2 de seis águas como é apresentada na FIGURA 18. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento do processo de extração do contorno associado a um telhado definido por seis águas, empregando o indicador de qualidade CA e análise das discrepâncias planimétricas dos vértices. Empregando-se uma análise visual da nuvem LIDAR associada à área A2, obteve-se o valor de 5,63 metros para o limiar de altura.

#### 5.2.2.1 Obtenção de Regiões - Edificação 2

Depois da segmentação da nuvem de pontos, através do limiar de altura, realizou-se a triangulação de Delaunay. A seguir procedeu-se a obtenção de regiões de diferentes águas, em conformidade com a etapa 3.2.3.



Devido à existência de um telhado conjugado e da proximidade de vegetação, examinou-se o comportamento do procedimento de obtenção de regiões quando a nuvem de pontos contém dois tipos de pontos adicionais ao telhado, pertencentes à vegetação e a um telhado conjugado. Na FIGURA 31 mostra-se a obtenção das águas da edificação empregando um limiar de altura que não permite isolar o telhado principal em forma de L. Observa-se nessa Figura que existem pontos pertencentes às árvores, próximas à edificação, junto com as regiões de pontos (águas) representativas do telhado, causando um erro no processo de segmentação e classificação de pontos de diferentes águas que compõem o telhado. Também se observa que quando o telhado principal possui um telhado conjugado ou esta próximo a um telhado vizinho, problemas de adição de pontos laser não pertencentes ao telhado principal, ocasionando igualmente um erro na segmentação e classificação dos pontos pertencentes as diferentes águas que compõem o telhado.

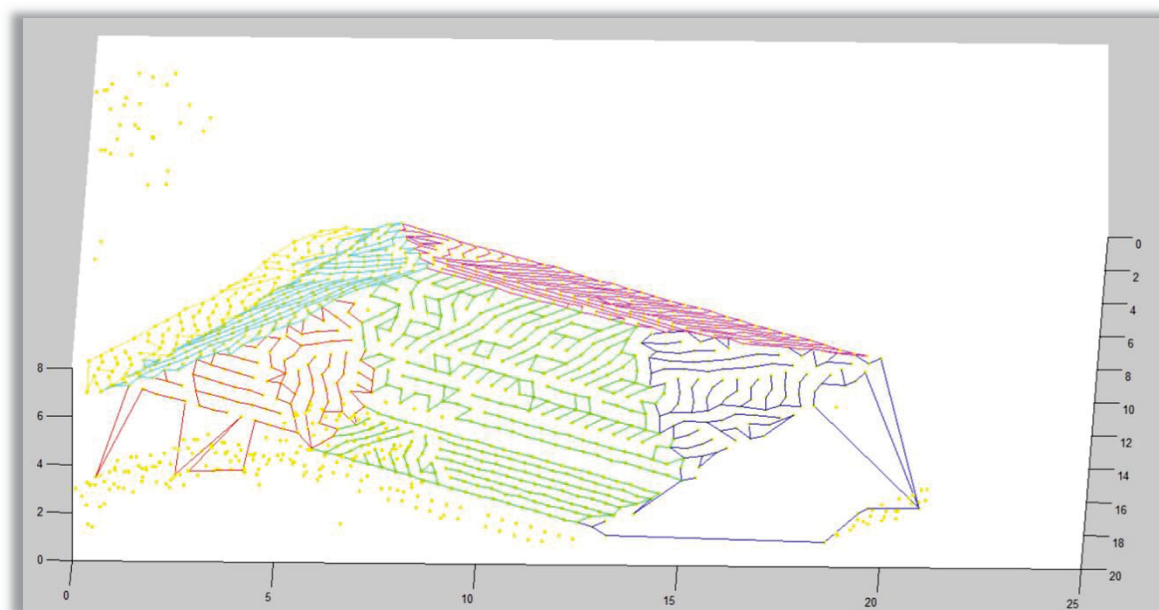


FIGURA 31 - TELHADO COM VEGETAÇÃO E TELHADO CONJUGADO:  
EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

Contrariamente ao anterior, empregando-se um limiar de altura adequado, por exemplo, o valor de 5,63 metros, a metodologia utilizada viabilizou a segmentação das seis regiões de pontos, representativas das seis águas do telhado principal, como é mostrado na FIGURA 32.

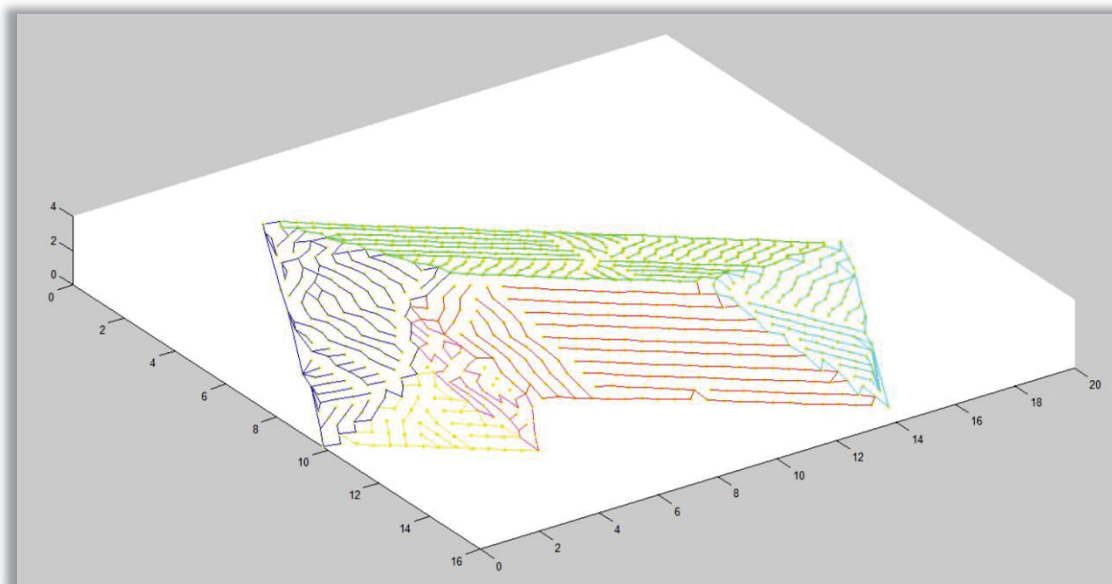


FIGURA 32 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

#### 5.2.2.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 2

Após a segmentação das regiões representativas das águas, empregou-se a metodologia apresentada em 3.2.4 para a definição dos contornos da edificação. No QUADRO 17 apresentam-se as coordenadas da origem local ( $P2_{CM}$ ), usadas no ajustamento.

	Coordenadas em E	Coordenadas em N	Coordenadas em H
$P2_{CM}$	290554,561 m.	9109768,193 m.	6,6779 m.

QUADRO 17 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM:

EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

Como resultado do ajustamento da nuvem de pontos, os pontos que representam os contornos do telhado da edificação são apresentados na Figura 33. Nessa Figura têm-se os seis segmentos que representam os contornos das águas do telhado da edificação em cor azul. Estes segmentos são chamados: S1E2, S2E2, S3E2, S4E2, S5E2 e S6E2.

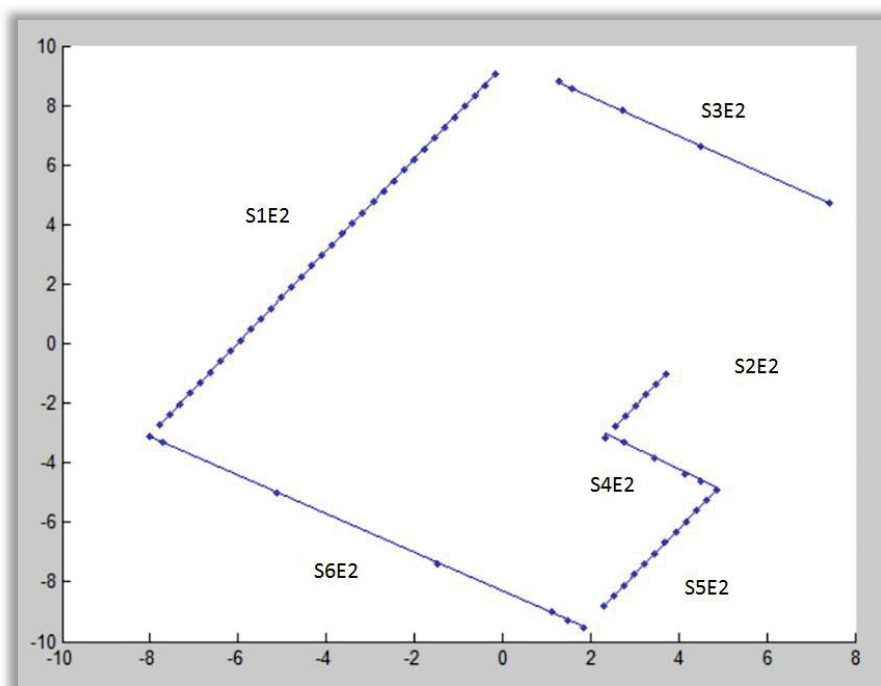


FIGURA 33 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE : EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013).

#### 5.2.2.3 Obtenção do Contorno - Edificação 2

Recorrendo ao estudo de comparação de distancias existentes entre os extremos dos segmentos, estabelece-se a conexão entre os contornos das águas para construir o contorno inicial. O resultado desse estudo é apresentado no QUADRO 18. Nesse QUADRO estabeleceu-se a existência de uma conexão satisfatória, mesmo com a união errada 2b-4a, mas que foi corrigida com a união 3b-2b. Por tanto a conectividade dos segmentos foi atingida.

Extremo origem	Extremo comparado	Distância (m)
1b	3a	1,457
1a	6a	0,445
3a	1b	1,457
6a	1a	0,445
2a	4a	0,308
2b	4a	2,425
4a	2a	0,308
3b	2b	6,809
4b	5b	0,085
5b	4b	0,085
5a	6b	0,838
6b	5a	0,838

QUADRO 18 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

Com a finalidade de encontrar o segmento mais representativo, os cálculos dos índices de predominância dos segmentos formados são apresentados no QUADRO 19. O segmento mais representativo encontrado foi o segmento S1E2.

Segmento	Distância do Segmento	Número de Pontos	Índice de Predominância	Índice de Predominância Normalizado
S1E2	14,029	50	701,464	1,000
S2E2	2,126	9	19,141	0,027
S3E2	7,372	9	66,346	0,094
S4E2	3,122	69	18,735	0,026
S5E2	4,674	17	79,463	0,113
S6E2	11,753	12	141,045	0,201

QUADRO 19 - ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013).

O QUADRO 20 mostra os parâmetros dos segmentos e a sua conectividade. Com o propósito de construir o contorno ortogonal, usa-se a declividade do segmento S1E2 cujo valor é 1,543 e o valor inverso negativo de este número.

Parâmetros da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta
Antes da ortogonalização	S1E2	1,543	9,288	S3E2	-0,660	9,604
	S1E2	1,543	9,288	S6E2	-0,649	-8,328
	S2E2	1,538	-6,725	S3E2	-0,660	9,603
	S2E2	1,538	-6,725	S4E2	-0,722	-1,391
	S4E2	-0,722	-1,391	S5E2	1,527	-12,328
	S5E2	1,527	-12,328	S6E2	-0,649	-8,328
Depois da ortogonalização	S1E2	1,543	9,288	S3E2	-0,648	9,604
	S1E2	1,543	9,288	S6E2	-0,648	-8,328
	S2E2	1,543	-6,725	S3E2	-0,648	9,603
	S2E2	1,543	-6,725	S4E2	-0,648	-1,391
	S4E2	-0,648	-1,391	S5E2	1,543	-12,328
	S5E2	1,543	-12,328	S6E2	-0,648	-8,328

QUADRO 20 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO:  
EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013).

Na FIGURA 34 apresentam-se os três diferentes contornos: inicial em cor azul, vermelho em cor ortogonal e verde o contorno encontrado pelo método manual. Nesta FIGURA, verifica-se que os lados Li2E2, Li4E2 e Li5E2 no contorno inicial bem como os lados Lo2E2, Lo4E2 e Lo5E2 no contorno ortogonal apresentam deslocamentos em relação no contorno manual.

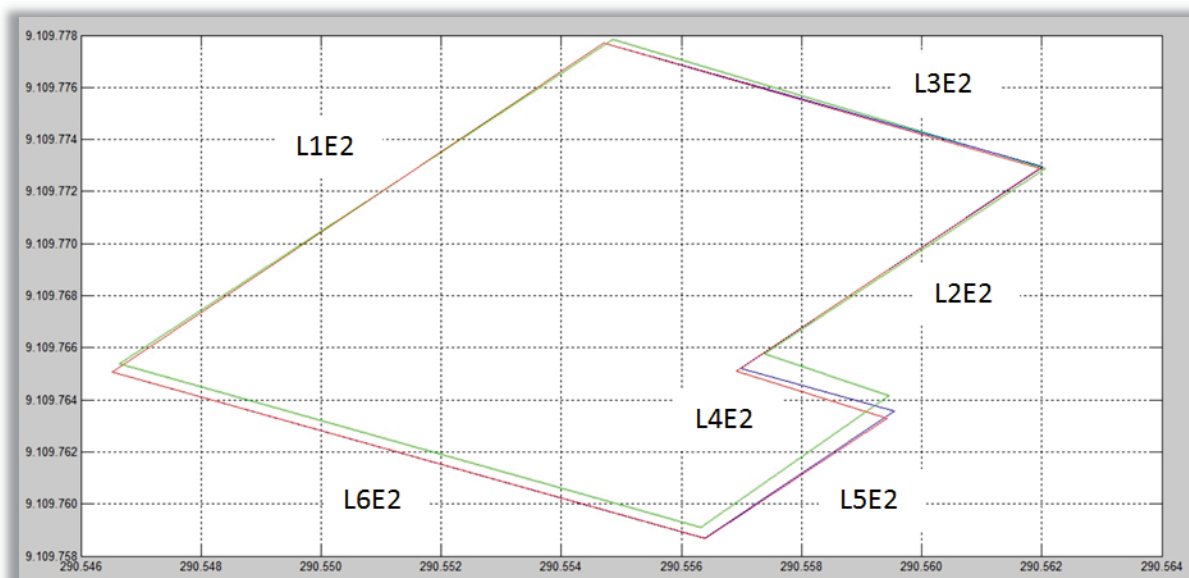


FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013).

Os deslocamentos nos lados encontrados nos dois tipos de contornos, antes mencionados, produzem uma ampliação pequena em comparação à área definido pelo contorno manual, como é mostrado no QUADRO 21.

Borda do Telhado	Valor Numérico da Área (m <sup>2</sup> )
Inicial	147.999
Ortogonal	148.790
Imagem Hipsométrica	145.711

QUADRO 21 - ÁREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

O QUADRO 22 mostra os resultados dos indicadores CA, conforme aos resultados obtidos do QUADRO 21. Os indicadores CA calculado para contorno inicial e ortogonal são equivalentes. Devido à obtenção de valores próximos de 100%, estes resultados manifestam um reconhecimento satisfatório.

Fonte Manual (A)	Fonte Autônoma (B)	CA
Hipsométrica	Inicial	98%
Hipsométrica	Ortogonal	98%

QUADRO 22 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

As FIGURAS 35 e 36 mostram as discrepâncias planimétricas entre os vértices dos contornos calculados e do contorno manual. Segundo essas FIGURAS, os afastamentos existentes entre os vértices dos contornos calculados em relação ao manual são semelhantes, mas os afastamentos são diferentes nas coordenadas E e N.

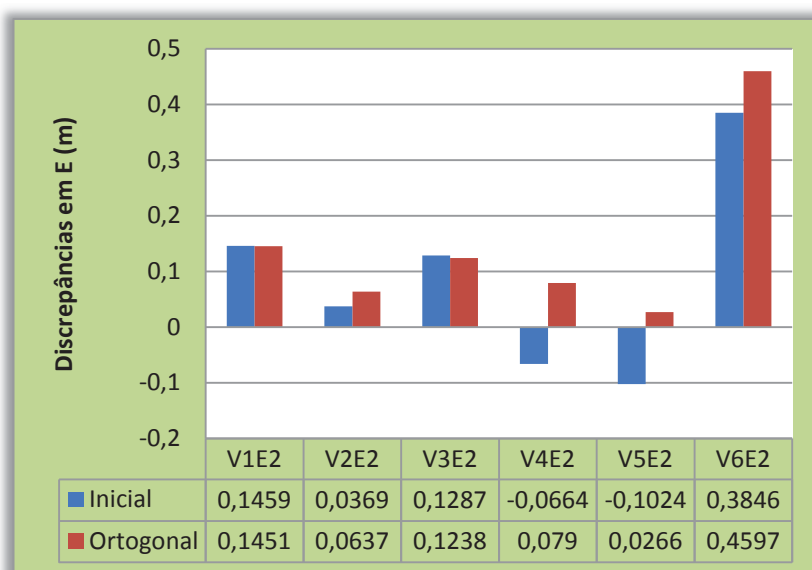


FIGURA 35 – DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

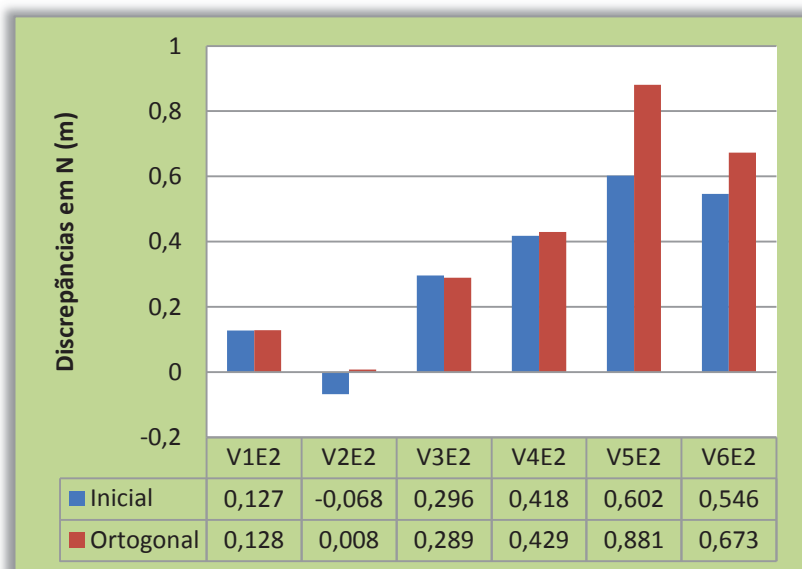


FIGURA 36 – DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 2.

FONTE: O Autor, (2013)

Os maiores deslocamentos em E deu-se nos vértices V1iE2, V1oE2, V2iE2, V2oE2, V3iE2, V3oE2, V6iE2 e V6oE2. No que concerne a coordenada N os maiores deslocamento aconteceu nos vértices V1iE2, V1oE2, V3iE2, V3oE2, V4iE2, V4oE2, V5iE2, V5oE2, V6iE2 e V6oE2.

### 5.2.3 Experimento 03 - Edificação 3

A área A3, pertence ao Bairro Graça, tem-se a Edificação 3 de oito águas como é apresentada na FIGURA 19. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento dos processos de extração de bordas na presença de um telhado definido por oito águas, empregando o índice de qualidade de extração o indicador CA. Para atingir esse objetivo foi utilizado de um levantamento LIDAR. Por meio da análise visual da nuvem de pontos pertencente à área A2 definiu-se altura mínima associada ao telado o valor de 8,598 metros.



### 5.2.3.1 Obtenção de Regiões - Edificação 3

Após a segmentação dos pontos associados ao telhado da edificação procedeu-se a triangulação de Delaunay. Posteriormente os pontos são processados conforme a metodologia apresentada na etapa 3.2.3. A FIGURA 37 mostra a segmentação das oito regiões representativas das oito águas existentes no telhado.

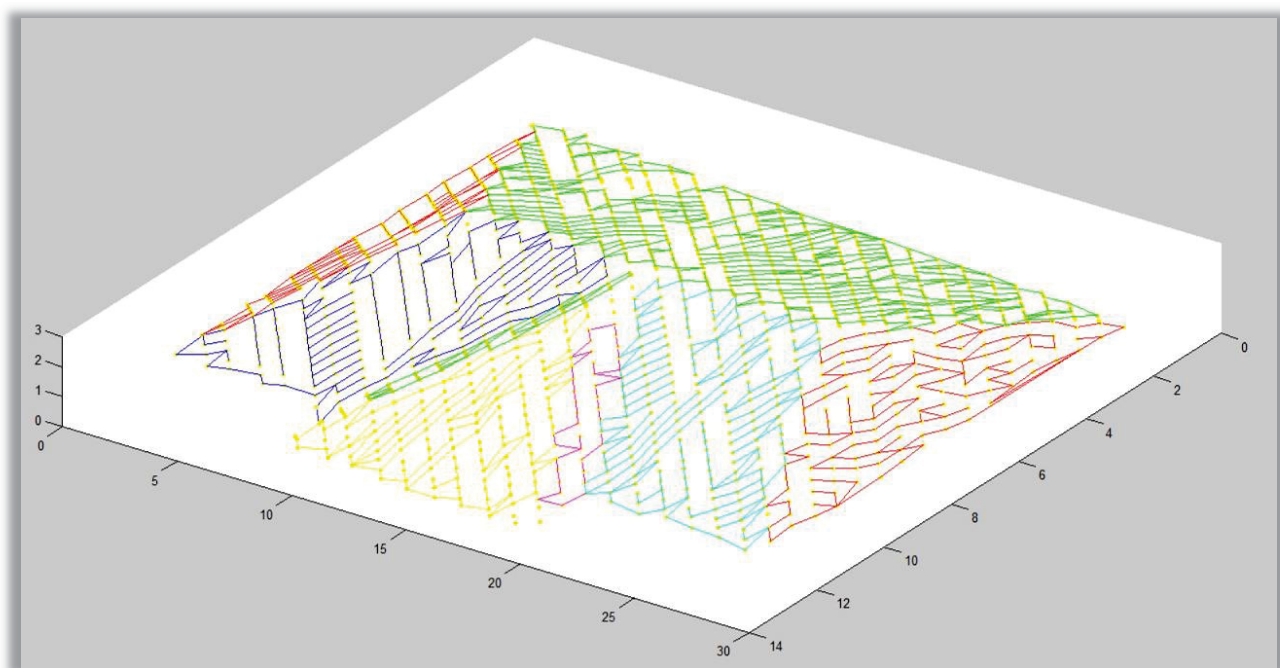


FIGURA 37 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

### 5.2.3.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 3

Antes de efetuar o ajustamento dos pontos, calcula-se uma origem local para o sistema de coordenadas,  $P3_{CM}$ , definida como sendo o centro geométrico da nuvem associada ao telhado. O valor obtido é apresentado no QUADRO 23.

	Coordenadas em E	Coordenadas em N	Coordenadas em H
P3 <sub>CM</sub>	290513,7258 m.	9109613,0712 m.	9,8358 m.

QUADRO 23 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM:

EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

A seguir procede-se com o ajustamento com o propósito de encontrar os segmentos que representam os contornos das águas mostrados na FIGURA 38. Estes segmentos representam os oito contornos que compõem o contorno do telhado. Os segmentos são denominados: S1E3, S2E3, S3E3, S4E3, S5E3, S6E3, S7E3 e S8E3.

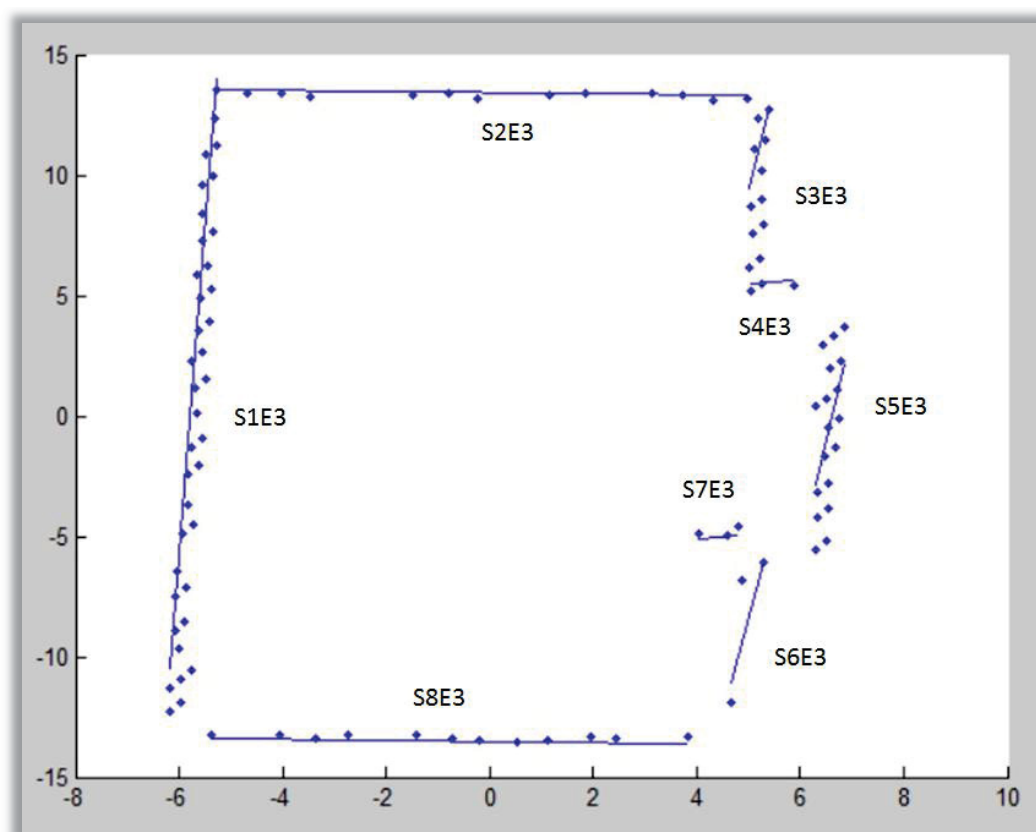


FIGURA 38 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE: EDIFICAÇÃO 3

FONTE: O Autor, (2013).

### 5.2.3.3 Obtenção do Contorno - Edificação 3

Para criar a características de conectividade entre os segmentos efetuou-se o estudo de comparação de distâncias entre os extremos dos segmentos. Os resultados obtidos, para este telhado, são mostrados no QUADRO 24. As conexões que foram definidas de forma correta foram: 1a-8a, 1b-2a, 2b-3b, 4b-5b, 6a-8b e 6b-7b e as não corretas: 5a-7a e 3a-4a.

A correção da conexão 5a-7a aconteceu no sistema por meio da conexão 5a-7b que representa a conectividade entre o segmento 7 e 5. No caso da conexão 3a-4a a solução veio da condição de fechamento, explicada na etapa 4.3.

Extremo origem	Extremo comparado	Distância (m)
1a	8a	3,031
1b	2a	0,515
2a	1b	0,515
2b	3b	0,759
3a	2b	3,908
3b	2b	0,759
4a	5b	3,736
4b	5b	3,546
5a	7b	2,538
5b	4b	3,544
6a	8b	2,643
6b	7b	1,259
7a	6b	1,583
7b	6b	1,259
8a	1a	3,031
8b	6a	2,643

QUADRO 24 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

Com o propósito de construir o contorno ortogonal, fez-se a determinação do segmento mais representativo por meio do cálculo do índice de predominância. O QUADRO 25 apresenta os valores calculados do índice para os diferentes grupos de pontos que representam os contornos das águas. Obteve-se que o segmento S1E3 é o mais representativo.

Segmento	Distância do Segmento	Número de Pontos	Índice de Predominância	Índice de Predominância Normalizado
S1E3	24,505	51	1249,748	1,000
S2E3	10,263	18	184,739	0,148
S3E3	3,310	16	52,963	0,042
S4E3	0,842	3	2,527	0,002
S5E3	5,129	30	153,879	0,123
S6E3	5,039	3	15,117	0,012
S7E3	0,777	4	3,110	0,002
S8E3	9,232	22	203,100	0,162

QUADRO 25 – ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

O QUADRO 26 mostra a variação das características dos parâmetros que definem os segmentos que compõem o contorno do telhado. O valor de declividade empregado para construir o contorno ortogonal foi de 26,645, assim como, o valor de sua inversa negativa.

Parâmetros da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta
Antes da ortogonalização	S1E3	26,645	151,469	S2E3	-0,015	13,337
	S1E3	26,645	151,469	S8E3	-0,025	-13,383
	S2E3	-0,016	13,337	S3E3	8,051	-33,116
	S4E3	0,167	4,455	S5E3	9,272	-61,324
	S5E3	9,272	-61,324	S7E3	0,240	-5,958
	S6E3	8,269	-49,169	S7E3	0,240	-5,958
	S6E3	8,269	-49,169	S8E3	-0,025	-13,383
	S4E3	0,167	4,455	S3E3	8,051	-33,116
Depois da ortogonalização	S1E3	26,645	151,469	S2E3	-0,037	13,337
	S1E3	26,645	151,469	S8E3	-0,037	-13,383
	S2E3	-0,037	13,337	S3E3	26,645	-33,116
	S4E3	-0,037	4,455	S5E3	26,645	-61,324
	S5E3	26,645	-61,324	S7E3	-0,037	-5,958
	S6E3	26,645	-49,169	S7E3	-0,037	-5,958
	S6E3	26,645	-49,169	S8E3	-0,037	-13,383
	S4E3	-0,037	4,455	S3E3	26,645	-33,116

QUADRO 26 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO:

EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

A FIGURA 39 mostra os três diferentes contornos: inicial em cor azul, o ortogonal em cor vermelha e o contorno encontrado pelo traçado manual na cor verde. Verifica-se no contorno ortogonal uma redução significativa do contorno se comparado com o obtido manualmente. O lado L1E3, tanto do contorno inicial como o do contorno ortogonal foi o que produziu menor deslocamento se comparado com o manual. No conjunto, os lados do contorno inicial ficaram mais próximos do contorno manual.

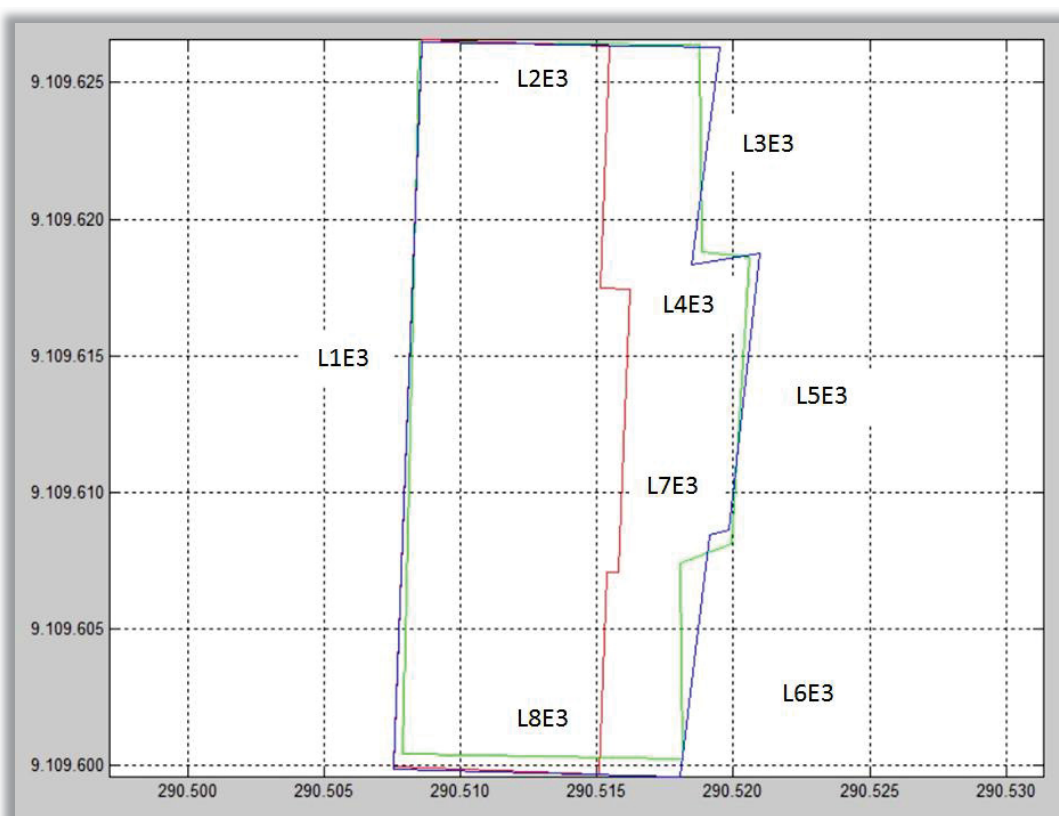


FIGURA 39 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

Em conformidade com os deslocamentos já mencionados, o QUADRO 27 mostra que área, obtida pelos contornos ortogonais, resulta num valor de aproximadamente  $90 \text{ m}^2$  menor do que a obtida pelos contornos manuais e a obtida pelos contornos iniciais teve um aumento de aproximadamente  $13 \text{ m}^2$ .

Borda do Telhado	Valor Numérico da Área (m <sup>2</sup> )
Inicial	302,859
Ortogonal	200,315
Imagem Hipsométrica	289,377

QUADRO 27 – ÁREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

No QUADRO 28 são mostrados os resultados do cálculo do indicador CA para os diferentes contornos. Os erros nos deslocamentos dos lados do contorno ortogonal, já mencionados, produziram um valor de CA baixo próximo a 70%. No caso do cálculo do CA para o contorno inicial obteve-se um valor próximo ao valor de 100%.

Fonte Manual (A)	Fonte Autônoma (B)	CA
Hipsométrica	inicial	95%
Hipsométrica	ortogonal	69%

QUADRO 28 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

Nas FIGURAS 40 e 41 são apresentados os afastamentos entre coordenadas planimétricas nos vértices obtidos com o procedimento manual versus automático. Os deslocamentos calculados dos vértices dos diferentes contornos têm um comportamento similar.

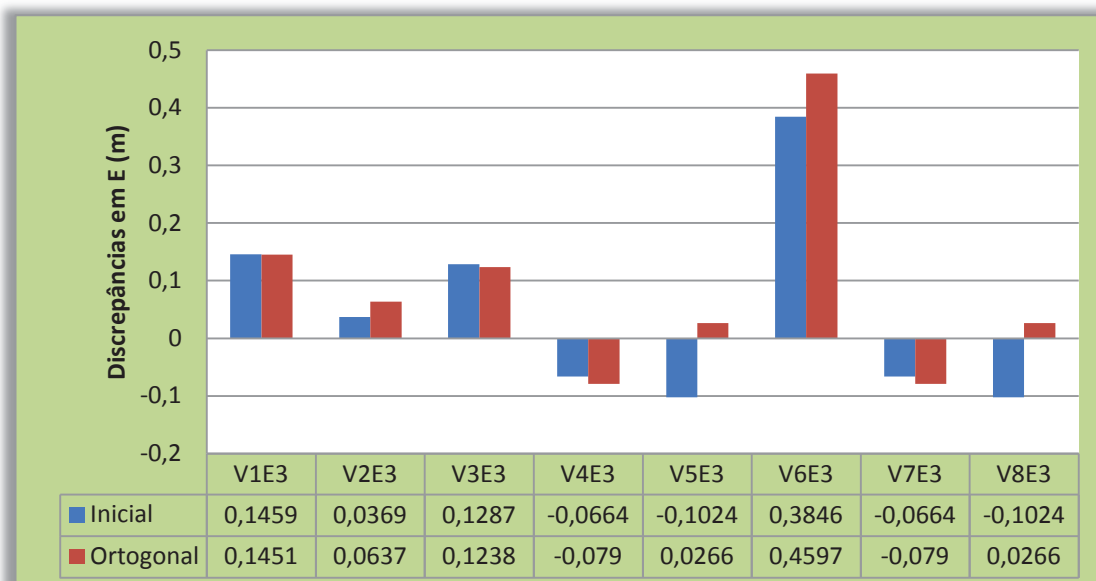


FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)

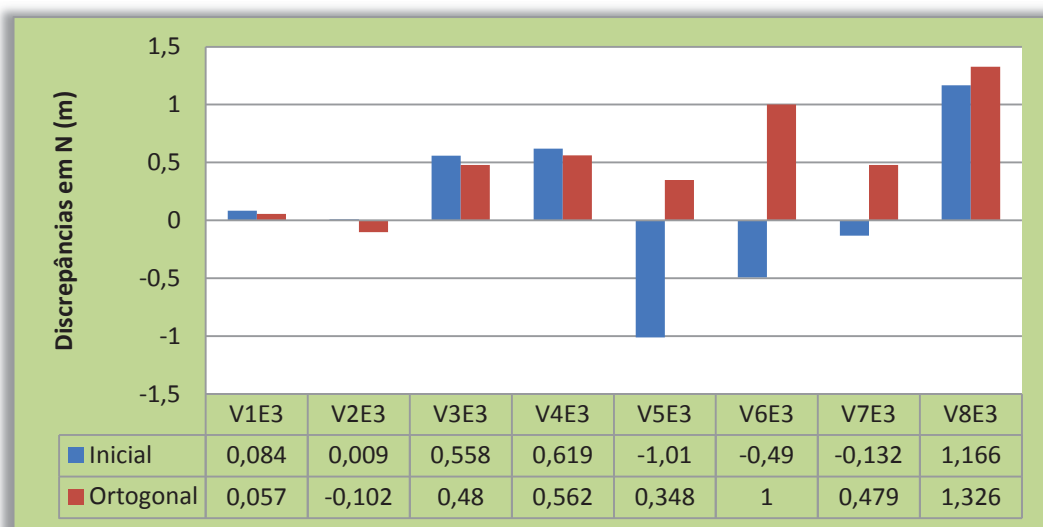


FIGURA 41 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 3.

FONTE: O Autor, (2013)



Comparando-se o contorno ortogonal com o manual, o vértice V6oE3 foi o que teve o maior deslocado no eixo E ( próximo a 45 cm). Os demais vértices ficaram com deslocamentos próximos aos 10 cm. Para o eixo N, os maiores deslocamentos acontecem em: V6oE3 e V8oE3 cujos valores são próximos a um metro. Com referência ao contorno inicial, o maior deslocamento no eixo E, próximo de 40 cm, foi no vértice V6iE3. Os demais afastamentos no eixo E ficaram próximo dos 10 cm. No caso dos deslocamentos em N, os maiores valores, próximos ao metro, foram encontrados em V5iE3 e V8iE3.

#### 5.2.4 Experimento 04 - Edificação 4

A área A4, pertence ao Bairro Graça, foi estuda uma Edificação com cobertura de telhado com grande número de águas, como é mostrada na FIGURA 20. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento dos processos de extração de contornos, na presença de uma cobertura definida por dez águas, empregando o indicador CA para verificar a qualidade da extração. Para atingir esses objetivos foi utilizado dados pontuais de um levantamento LIDAR. Através da análise visual da nuvem de pontos LIDAR próxima a edificação, definiu-se o valor de 7,356 m como sendo a altura do ponto mais baixo associado ao telhado.

##### 5.2.4.1 Obtenção de Regiões - Edificação 4

Devida uma falha na rotina de separar pontos pertencentes à vegetação que não satisfaçam as condições de pertencer a uma das águas do telhado, verifica-se na FIGURA 42 a existência de vegetação ao redor da edificação, como pode ser verificada pela nuvem de pontos ao redor da edificação. Apesar dessa dificuldade, pode-se notar que houve a obtenção das regiões representativas das águas do telhado da edificação. Este tipo de resultado é particular, pois como já mostrado no estudo da AREA2, o caso mais geral é a união de pontos pertencentes à vegetação com regiões representativas dos telhados.

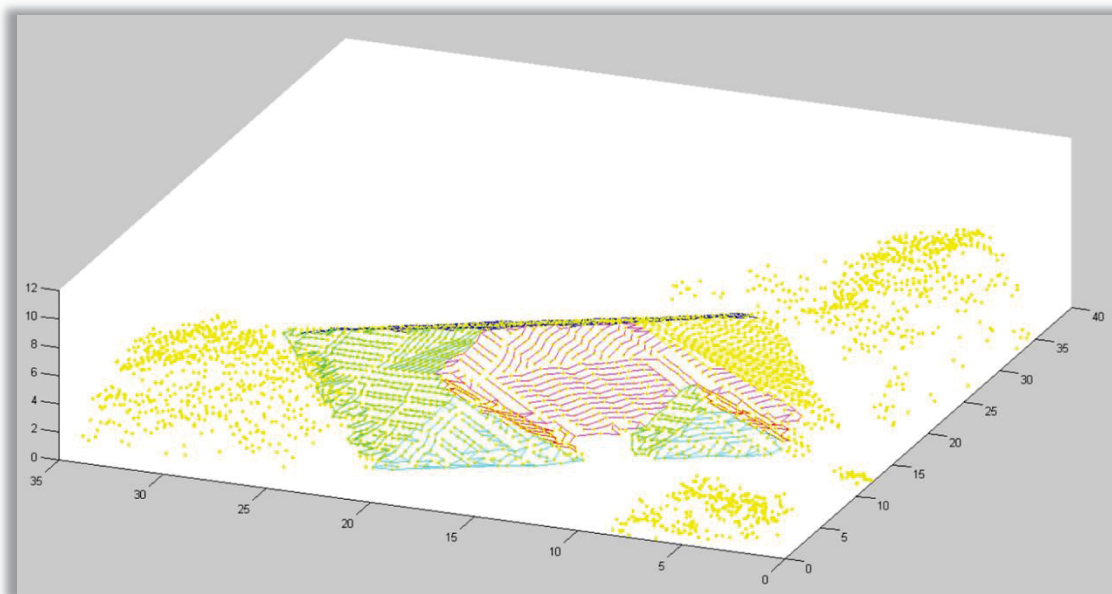


FIGURA 42 - TELHADO COM VEGETAÇÃO: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

Para viabilizar a realização do experimento, reduziu-se a área ao redor da edificação, eliminando-se uma maior quantidade de pontos pertencentes à vegetação. Assim, o resultado final da segmentação, conforme os procedimentos mencionados na etapa 3.2.3, são mostrados na FIGURA 43. Nessa FIGURA são apresentadas somente as dez regiões representativas das dez águas do telhado.

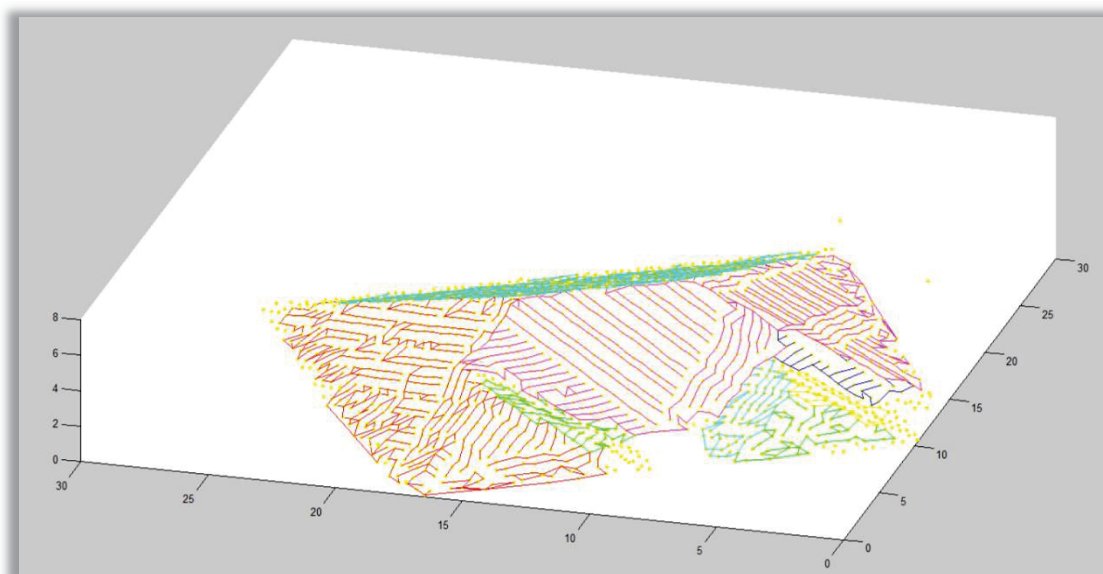


FIGURA 43 - SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

#### 5.2.4.2 Obtenção de Segmentos - Edificação 4

A origem do sistema local foi estabelecida no centro geométrico,  $P4_{CM}$ , obtida com a nuvem de pontos de todo do telhado. Suas coordenadas são apresentas no QUADRO 29.

	Coordenadas em E	Coordenadas em N	Coordenadas em H
$P4_{CM}$	290308,6897 m.	9110410,2225 m.	8,7764 m.

QUADRO 29 - COORDENADAS DO CENTRO GEOMETRICO DA NUVEM:  
EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

Como já mencionado, empregando um procedimento de ajustamento, os segmentos que representam os contornos das águas do telhado são obtidos. Os segmentos para este experimento são apresentados na FIGURA 44. Estes são denominados de: S1E4, S2E4, S3E4, S4E4, S5E4, S6E4, S7E4, S8E4, S9E4 e S10E4.

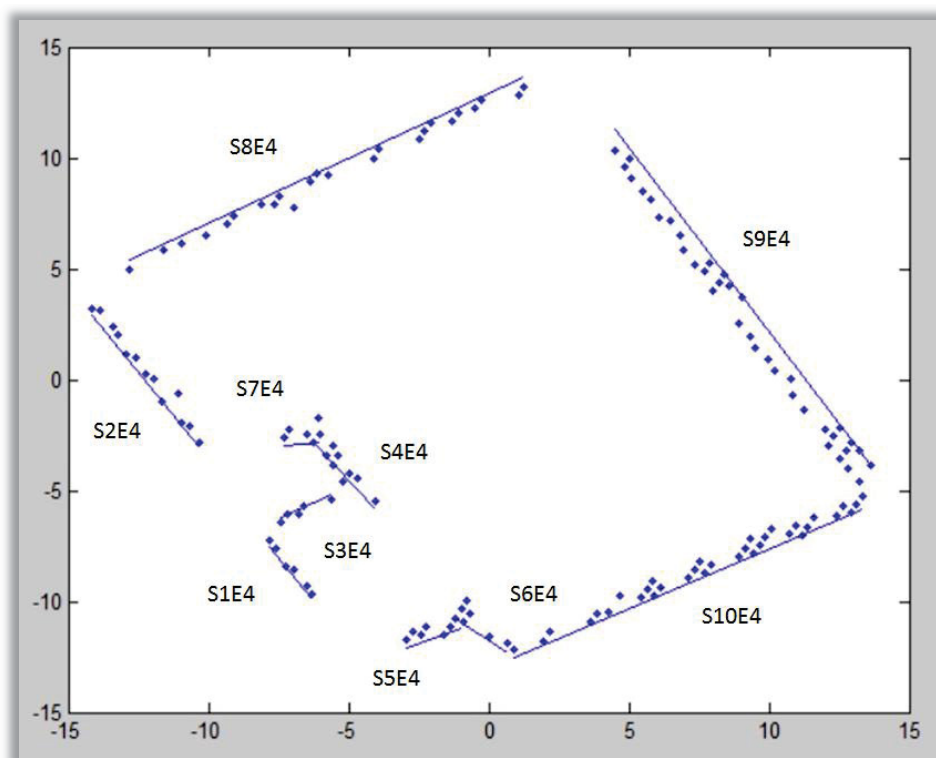


FIGURA 44 - SEGMENTOS OBTIDOS POR O AJUSTE : EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013).

#### 5.2.4.3 Obtenção do Contorno - Edificação 4

Por meio do estudo de distâncias entre os extremos, obteve-se a conectividade entre os segmentos. Os resultados deste estudo são apresentados no QUADRO 30. Neste QUADRO apresentam-se as uniões entre os segmentos. As uniões corretas foram: 1a-3a, 2a-8a, 3b-4b, 4a-7b, 5b-6a e 6b-10a. A conexão 2b-7a não foi corretamente detectada duas vezes, mas houve a detecção de uma que viabilizou o fechamento do contorno. O erro na detecção da união 1b-5a foi resolvido por meio da condição de fechamento, explicada na etapa 3.3.

Extremo origem	Extremo comparado	Distância (m)
1a	3a	1,411
1b	3a	3,864
2a	8a	2,808
2b	7a	3,003
3a	1a	1,411
3b	4b	1,686
4a	7b	0,208
4b	3b	1,688
5a	6a	2,214
5b	6a	0,528
6a	5b	0,528
6b	10a	0,357
7a	4a	1,065
7b	4a	0,208
8a	2a	2,808
8b	9a	4,023
9a	8b	4,023
9b	10b	2,018
10a	6b	0,357
10b	9b	2,018

QUADRO 30 - CONECTIVIDADE DE SEGMENTOS: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

Com a conectividade estabelecida, construiu-se o contorno inicial. Para construir o contorno ortogonal, procedeu-se o cálculo do índice de predominância para conhecer o lado mais representativo. Os resultados dos índices de predominância são apresentados no QUADRO 31. Neste experimento, o segmento mais representativo foi o S9E4.

Segmento	Distância do Segmento	Número de Pontos	Índice de Predominância	Índice de Predominância Normalizado
S1E4	2,792	7	19,546	0,023
S2E4	7,122	17	121,069	0,143
S3E4	2,054	6	12,326	0,014
S4E4	3,736	12	44,840	0,053
S5E4	2,140	7	14,986	0,018
S6E4	2,420	7	16,941	0,020
S7E4	1,274	7	8,916	0,010
S8E4	16,317	31	505,821	0,597
S9E4	17,639	48	846,684	1,000
S10E4	14,105	48	677,051	0,799

QUADRO 31 – ÍNDICE DE PREDOMINÂNCIA : EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

No QUADRO 32 apresenta-se a mudança dos parâmetros de declividade dos segmentos com o propósito da formação do contorno ortogonal. As declividades usadas na construção do contorno ortogonal são a declividade -1,654 do segmento S9E4 e a sua inversa negativa.

Parâmetros da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta	Segmento	Declividade da reta	Coefficiente Linear da reta
Antes da ortogonalização	S1E4	-1,574	-19,606	S3E4	0,557	-2,232
	S2E4	-1,541	-18,527	S7E4	0,103	-1,726
	S2E4	-1,541	-18,527	S8E4	0,584	12,529
	S3E4	0,557	-2,232	S4E4	-1,379	-11,085
	S4E4	-1,379	-11,085	S7E4	0,103	-1,726
	S5E4	0,452	-10,321	S6E4	-0,837	-11,335
	S6E4	-0,837	-11,335	S5E4	0,542	-12,643
	S8E4	0,584	12,529	S9E4	-1,654	17,645
	S9E4	-1,654	17,645	S10E4	0,542	-12,643
	S1E4	-1,574	-19,606	S10E4	0,452	-10,321
Depois da ortogonalização	S1E4	-1,654	-19,606	S3E4	0,605	-2,232
	S2E4	-1,654	-18,527	S7E4	0,605	-1,726
	S2E4	-1,654	-18,527	S8E4	0,605	12,529
	S3E4	0,605	-2,232	S4E4	-1,654	-11,085
	S4E4	-1,654	-11,085	S7E4	0,605	-1,726
	S5E4	0,605	-10,321	S6E4	-1,654	-11,335
	S6E4	-1,654	-11,335	S5E4	0,605	-12,643
	S8E4	0,605	12,529	S9E4	-1,654	17,645
	S9E4	-1,654	17,645	S10E4	0,605	-12,643
	S1E4	-1,654	-19,606	S10E4	0,605	-10,321

QUADRO 32 - PARÂMETROS ANTES E DEPOIS DA ORTOGONALIZAÇÃO:

EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

Na FIGURA 45 são apresentados os três diferentes contornos: inicial na cor azul, o ortogonal na cor vermelha e o contorno obtido manualmente na cor verde. Verifica-se nessa figura que os maiores afastamentos dos lados, com respeito ao contorno manual, pertencem ao contorno ortogonal. Estes lados são: L7E4 e L4E4.

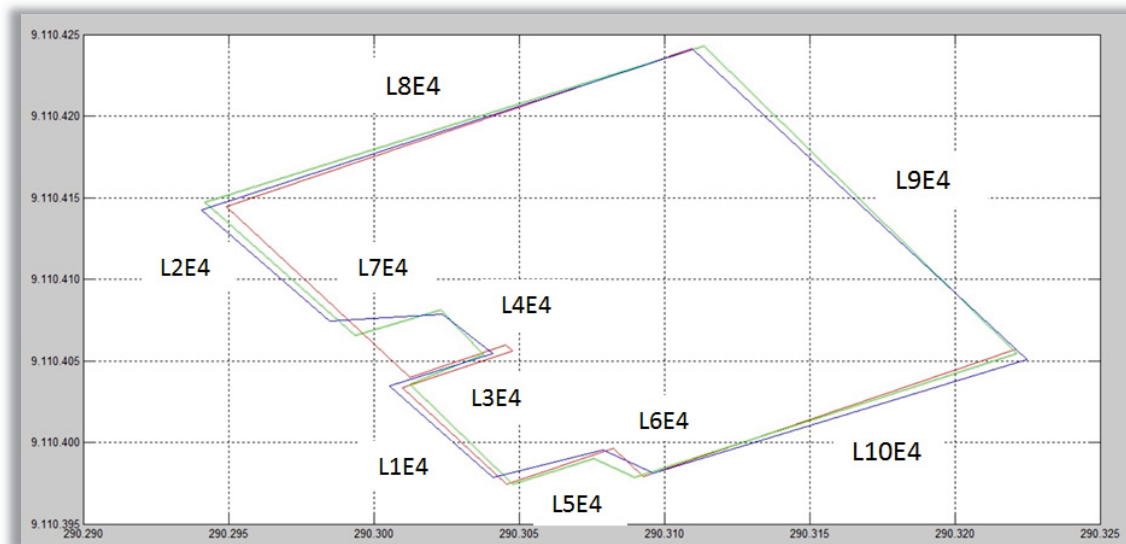


FIGURA 45 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

No QUADRO 33 verifica-se que os deslocamentos do contorno ortogonal, já mencionados, reduz a área mais do que a provocada pelos pequenos deslocamentos existentes no contorno inicial. Comparando-se as áreas dos polígonos, obtidos com a metodologia autônoma e a manual, a diferença de áreas foram de aproximadamente  $5\text{m}^2$  no caso do contorno ortogonal e de aproximadamente  $1\text{m}^2$  para contorno inicial.

Borda do Telhado	Valor Numérico da Área ( $\text{m}^2$ )
Inicial	402,816
Ortogonal	397,976
Definida manualmente	403,630

QUADRO 33 - ÁREA DEFINIDA POR CONTORNOS: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)



O QUADRO 34 mostra os resultados do cálculo do indicador CA nos diferentes tipos de contornos. Os resultados obtidos para os dois tipos de contornos são próximos.

Fonte Manual (A)	Fonte Autônoma (B)	CA
Hipsométrica	Inicial	100%
Hipsométrica	Ortogonal	98%

QUADRO 34 - INDICADORES CA: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

As (FIGURAS 46 e 47) são apresentados os afastamentos entre coordenadas planimétricas nos vértices obtidos com o procedimento manual versus automático.

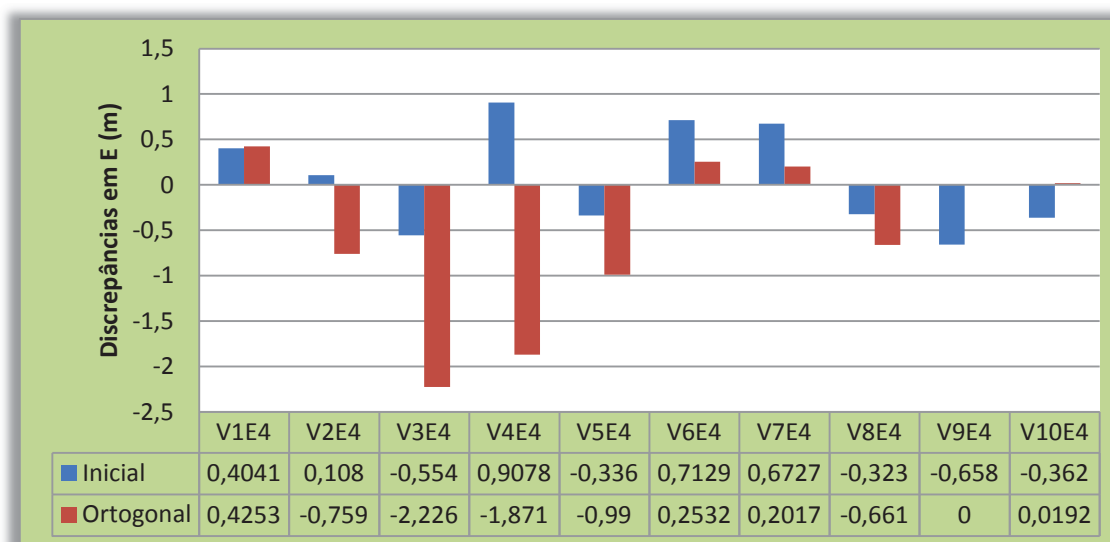


FIGURA 46 - DISCREPÂNCIAS EM E: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

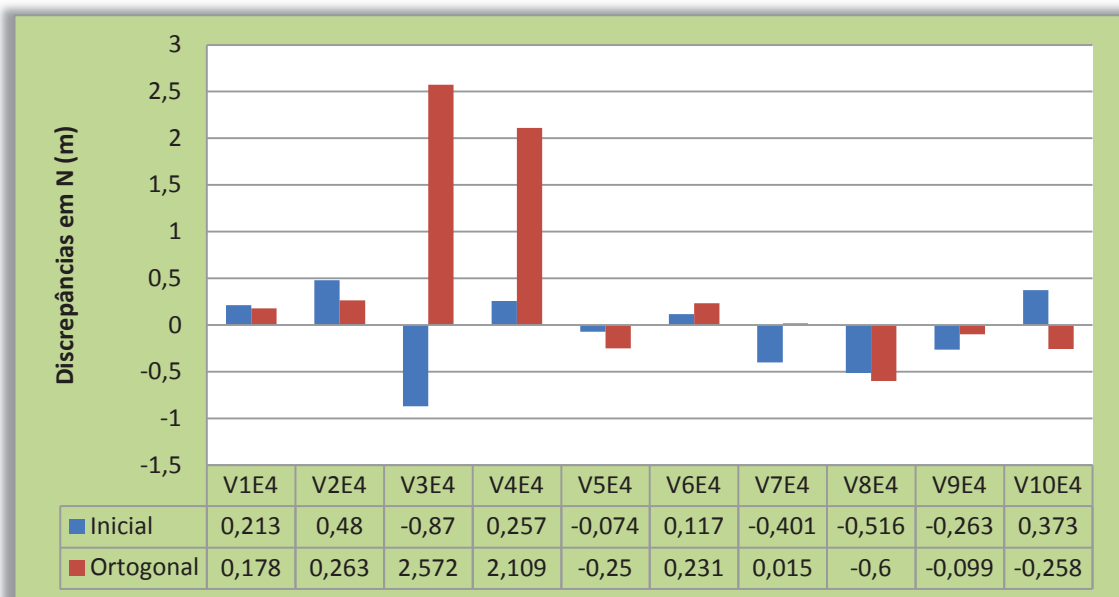


FIGURA 47 - DISCREPÂNCIAS EM N: EDIFICAÇÃO 4.

FONTE: O Autor, (2013)

Com relação ao contorno inicial, os vértices V3iE4 e V4iE4 foram os que apresentaram maior valor de deslocamento (próximos a 1m). Os demais vértices possuem deslocamentos próximos a 50 cm. Em relação a N os vértices V2iE4, V8iE4 e V10iE4 são próximos a 50 cm. Em relação ao contorno ortogonal, os vértices com maiores deslocamentos em E são V3oE4, V4oE4, próximos aos 2 m, o vértice V5oE4, próximo a 1 m. Com relação ao eixo N, o vértice V8oE4 possui deslocamento próximo a 50 cm e os vértices V3oE4 e V4oE4 possuem deslocamentos próximos aos 2 m. Os demais vértices possuem deslocamentos próximos aos 60 cm. Por tanto, os vértices V3oE4, V4oE4 e V5oE4 são os que produziram os maiores deslocamentos planimétricos.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Em conformidade com os resultados obtidos pode-se mencionar que este trabalho aporta uma metodologia de extração de contornos de edificações caracterizada, inicialmente, por um processamento da nuvem de pontos brutos por meio de crescimento de regiões que visa a separação de pontos laser em diferentes águas do telhado da edificação, utilização do índice de predominância como parâmetro empírico para grupos de pontos que definem uma feição linear e o emprego de uma solução particular de um estudo de conectividade pela posição relativa dos extremos de segmentos para conectar as bordas lineares detectadas.

Pode-se concluir que o sucesso na etapa de segmentação é fortemente dependente da densidade da nuvem de pontos LIDAR e a solução para a extração de contorno não é geral. Considera-se particular porque se usou um único método de agrupamento de pontos para obter regiões representativas de pontos pertencentes ao telhado, pois devido, na grande maioria dos telhados analisados, à existência de diferentes objetos acima do telhado e de erros no registro na nuvem, o método de crescimento de regiões somente obteve pontos associadas a uma água (plano) quando uma semente de pontos associados foi informada. Uma característica particular necessária ao funcionamento do método é que o conjunto das águas dos telhados seja a cobertura ou telhado da edificação analisada, ou melhor, a conectividade entre as águas crie uma superfície fechada.

Os resultados revelam que quando se obtém as regiões representativas das águas dos telhados por meio do método de crescimento de regiões, os contornos inicial e ortogonal resultantes são próximos ao contorno manual. A eleição de segmentos mais representativos por meio do índice de predominância gera bons resultados quando os segmentos são longos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AXELSSON, P. **Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Application**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54, p. 138 – 147, Dec 1999.

BILEN, B. **Model Based Building Extraction from High Resolution Aerial Images**. 84f. Tese (Mestrado em Tecnologias da Informação em Geodésia e Geografia) – Escola de Ciências Naturais e Aplicadas, Universidade Técnica do Oriente Médio, Ancara, Turquia. 2004.

BOROUCHAKI, H.; GEORGE, P. L.; HECHT, F.; LUG, P.; SALTEL, E. **Delaunay mesh generation governed by metric specification**. Part I. Algorithms. Finite elements in Analysis and Design. v. 25. p. 61 – 83, 1997.

BOUWMEESTER, H. **Monitoring Soil Erosion from High Resolution DTMs: Present Possibilities and Future Prospects**. Soil Conservation and Protection for Europe. SCAPE workshop in Cinque Terre (IT) Abr. 2004.

BRENNER, C. **Building Reconstruction from Laser Scanning and Images**. Proceedings of ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques. Enschede. Nov. p.8. 2003.

CHEN, D.; ZHANG, L.; LI, J.; LI, R. **Urban Building roof segmentation from airborne lidar point clouds**. International Journal of Remote Sensing. v. 33, p. 6497-6515. 2012.

CYGANEK, B. **Object Detection and Recognition in Digital Images: Theory and Practice**. 1. ed. Chichester: John and Wiley Ltd., 2013.

DE BERG, M.; VAN KREVELD, M.; OVERMARS, M.; SCHWARZKOPF, O. **Computational Geometry : Algorithms and Applications**. 2.ed.rev.Ed Springer Ltda., New York, Berlin, 2000.

DELAUNAY, B. **Sur le sphere vide. A la mémoire de Georges Voronoi**. Boletim de la Academia de Ciências Matemáticas e Naturais de la URRS, Aula de Ciências Matemáticas e Naturais. n. 6. p. 793-800. 1934.

DIEZ, A.; AROZARENA, A.; ORMEÑO, S.; AGUIRRE, J.; RODRIGUEZ, R.; SAENZ, A. **Fusion and Optimization of LIDAR and Photogrammetric Technologies and Methodologies for Cartographic Production**. Part B1. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences v. XXXVII. 2008.

DOUGLAS, D.; PEUCKER, T. **Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature**. Canadian Cartographer. v.10, n.2, p.112-122, 1973.

DOS SANTOS, G.M.; BASTOS, B. C.; MACIEL, O. A.; DITZEL, T. G. **Detecção Automática de Contornos de Edificações a partir de dados LIDAR**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5471.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. **Rectilinear building roof contour extraction based on snakes and dynamic programming**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation v.25 p.1-10 Mar. 2013.

FISHER, R.B.; DAWSON-HOWE,K.; FITZGIBBON,A.; ROBERTSON,C.; TRUCCO.E.

**Dictionary of Computer Vision and Image Processing**. John Wiley and Sons, Ltd., 2005.

FUJII, T.; FUKUCHI, T. **Laser Remote Sensing**. 1.ed. Florida: Taylor and Francis Ltda., 2005.

GALVANIN, E. A. **Extração Automática de Contornos de Telhados de Edifícios em um Modelo Digital de Elevação, Utilizando Inferência Bayesiana e Campos Aleatórios de Markov**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

GALVANIN, E.; DAL POZ, A. **Extraction of Building Roof Contours From LIDAR Data Using a Markov-Random-Field-Based Approach**. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, v. 50, pp. 3, 2012.

GHILANI, C. D. **Adjustment Computations Spatial Data Analysis**. 5.ed New Jersey: John Wiley and Sons Ltd., 2010.

GOMARASCA, M. **Basics of Geomatics**. 1.ed Milan: Springer Ltda., 2004.

GOODCHILD, M.F. **Geographical Data Modeling**. Computers and Science. Londres. v.18, n.4. p. 401-408. 1992.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. **Processamento de imagens digitais**. 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blüchner Ltda., 2000.

HABIB, A.; KWAK, E.; AL-DURGHAM, M. **Model Based Automatic 3D Building Model Generation by Integrating LIDAR and Aerial Images**. Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, v. 22 p. 187-200, 2011.

HU, X.; YE L. **A Fast and Simple Method of Building Detection from LIDAR Data Based on Scan Line Analysis**. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. II-3/W1 p. 7-13, 2013.

HEATH, M.; SARKAR, S.; SANOCKI T.; BOWYERY, K. **Comparison of Edge Detectors a Methodology and Initial Study**. Computer Vision and Image Understanding, v. 69, p. 38-54, 1998.

HOOVER, A.; JEAN-BAPTISTE, G.; JIANG, X.; FLYNN, P.J.; BUNKE, D. B.; GOLDOF, D. B.; BOWYER, K.; EGGERT, D.W.; FITZGIBBON, A.; FISHER, R.B. **An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.18, p. 193-198,1996.

Hu, Y. **Automated Extraction of Digital Terrain Models, Roads and Buildings Using Airborne LIDAR Data**. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Geomatica. Universidade de Calgary. 2003.

KIM, T., MULLER, J. **Development of a graph based approach for building detection**. Image and Vision Computing v. 17. p. 3-14, 1999.

LEE, I.; SCHENK, T. **Autonomous extraction of planar surfaces from airborne laser scanning data**. Dept. of Civil an Environmental Engineering and Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio. 2001.

LEE, I.; SCHENK, T. **Perceptual Organization of 3D Surface Points**. International Archives of Photogrammetry, Remote and Spatial Information Sciences, v. 34. p. 193-198, 2002.

LI, J.; LI, Y.; CHAPMAN, M. **Building Edge Extraction from LIDAR Based on Jump Detection in Non-Parameter Regression Model**. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, PADUA, P. 28-31, MAY, 2007.

LOWE, D.G. **PERCEPTUAL ORGANIZATION AND VISUAL RECOGNITION**. Kluwer Academic Publishers. Boston. 1985.

MACHADO, A. M. L. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados LIDAR**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

MAYER, H. **Automatic Object Extraction from Aerial Imagery - A Survey Focusing on Buildings**. Computer Vision and Image Understanding, v. 74. p. 138-149, 1999.

McGILL, M. **LIDAR REMOTE SENSING**. Encyclopedia of Optical Engineering. Mar, 2002.

MITISHITA, E. A. **Monorrestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D. para Fins de Mapeamento na Área Florestal**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1997.

NIEMEYER, J; MALLET, C; ROTTENSTEINER, F; SÖRGEL. **Conditional Random Fields for the Classification of LIDAR Point Clouds**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), v. 38 (Part 4/W19), Hannover, Germany, Jun 2011.

ROGGERO M. **Airborne Laser Scanning: Clustering in Raw Data**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, v. 34. p. 227-232, 2001.

ROTTENSTEINER, F.; SHON, G. JUNG, J.; GERKE, M.; BAILLARD, C.; BENITEZ, S.; BREITKOPF, U. **The ISPRS Benchmark on Urban Object Classification and 3D Building Reconstruction**. ISPRS, Commission III, WG III, 4. 2012.

ROTTENSTEINER, F.; SHON, G.; GERKE, M.; WEGNER, D. **ISPRS TEST PROJECT ON URBAN CLASSIFICATION AND 3D BUILDING RECONSTRUCTION**. ISPRS, Working Group III / 4 - 3D Scene Analysis. 2013.

SOHN, G. **Extraction of Buildings from High-Resolution Satellite Data and Airborne LIDAR**. Tese (Ph.D.) Departamento de Engenharia Geomática . Universidade de Londres. 2004.

SENTHIKUMARAN, N.; RAJESH, R. **Edge Detection Techniques for Image Segmentation a Survey of Soft Computing Approaches**. International Journal of Recent Trends of Engineering, v. 1. n. 2. May, 2009.

SITHOLE, G.; VOSSSELMAN, G. **Automatic Structure Detection in a Point Cloud of an Urban Landscape**. Proceedings of 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. p. 67-71. 2003.

SVELTO, O.; HANNA, D.C. **Principles of Lasers**. 5.ed London: Springer Ltda., 2010.

OPTECH **Airborne Laser Terrain Mapper - ALTM 2050 Specifications** – Toronto, Canada, 2002.

SHAN, J.; TOTH, C. **Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing** . 1. ed. Florida: Ed. Taylor & Francis Group Ltda., 2008.

TARSHA-KURDI, F; LANDES, T; GRUSSENMEYER, P. **Hough-Transform and Extend RANSAC ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF 3D BUILDING ROOF PLANES FROM LIDAR DATA**. ISPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, pp. 407-412. 2007.

TARSHA-KURDI, F.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P.; KOEHL, M. **Model-Driven and Data-Driven Approaches Using LIDAR Data Analysis and Comparison**. ISPRS International Archives of Photogrammetry. v. 36. 3/W49A. pp. 87-92. 2007.

TIWARI, P. S.; PANDE, H. **LIDAR Remote Sensing Applications in Automated Urban Feature Extraction**. Laser Scanning, Theory and Applications. InTech. pp. 61-74. India. 2011

VOSSSELMAN, G. **Laser scanning**. In: **Encyclopedia of GIS** / em S. Shekhar and H. Xiong. Berlin : Springerpart 15. pp. 609-612. 2008.

VOSSELMAN, G. **Advanced Point Cloud Processing**. Photogrammetric Week '09, pages p.137-146. Heidelberg, 2009.

WANG, Y. **FULLY AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF VIRTUAL ENVIRONMENT**. Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais e de Meio Ambiente da Universidade Albert- Ludwigs, Freiburg, Alemanha, 2008.

WANG, J.; SHAN, J. **SEGMENTATION OF LIDAR POINT CLOUDS FOR BUILDING EXTRACTION** .ASPRS Annual Conference . Baltimore.2009.

WEHR, A.; LOHR, U. **Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54, n. 3, pp.68-82, 1999.